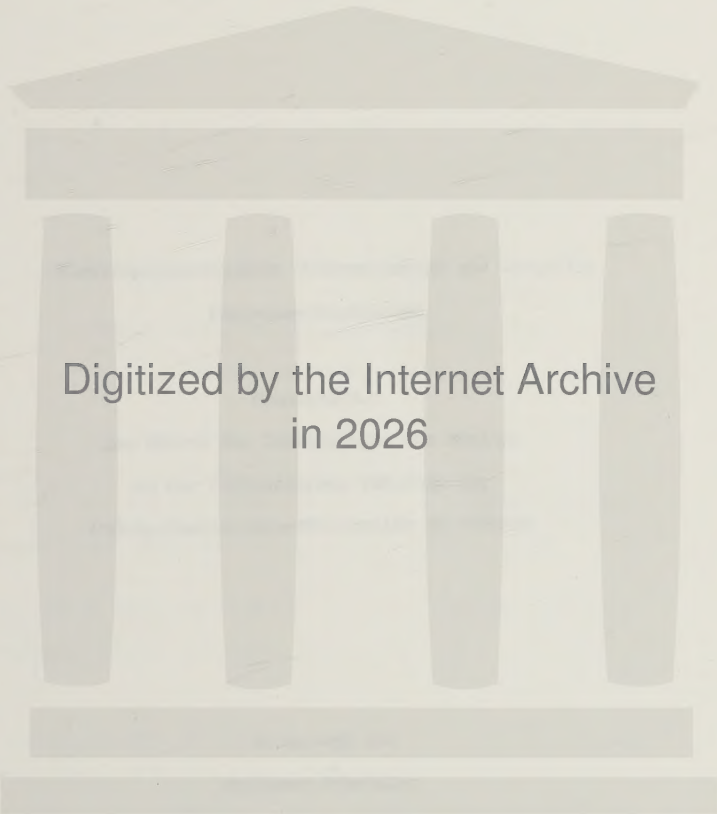


**ELEKTROPHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR
VISUELLEN KONTRASTVERARBEITUNG**

WOLFGANG SCHEIDLER

1986



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Medizinische Psychologie der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Professor Dr. phil. E. Pöppel

Elektrophysiologische Untersuchungen zur visuellen
Kontrastverarbeitung

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Wolfgang Scheidler

aus

Gröbenzell

1986

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. habil. Dr. rer. nat.
Dr. rer. nat. habil. Ingo Rentschler

Mitberichterstatter: Prof. Dr. phil. E. Pöppel
Prof. Dr. med. E. Zrenner

Dekan: Prof. Dr. med. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 23.07.1986

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	7
2.1 Aufbau des visuellen Systems	7
2.2 Zur Entstehung und Meßtechnik der evozierten Potentiale	12
3. Versuchsdurchführung und Auswertung	16
3.1 Testfeld und Testmuster	16
3.2 Apparatur	20
3.3 Anmerkungen zur Elektrodenplatzierung	23
3.4 Messung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion	25
3.5 Methoden der VEP-Bestimmung und Auswertung	27
3.5.1 Grundlegende Anmerkungen	27
3.5.2 Stimuluserzeugung	30
3.5.3 VEP-Auswertung	31
4. Versuchsergebnisse	34
4.1 Voruntersuchungen	34
4.1.1 Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse	34
4.1.2 Verhalten der VEP bei rasch aufeinander- folgenden Versuchssitzungen	35
4.1.3 Beeinflussung der VEP-Antwort durch die Größe des Sehwinkels	36
4.2 Darstellung des Amplitudenverhaltens emmetroper Versuchspersonen	42
4.3 Darstellung des Phasenverhaltens	45
4.4 Darstellung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion	49
4.5 Diskussion der Versuchsergebnisse	72
5. Zusammenfassung	80
6. Literaturverzeichnis	83

1. Einleitung

Die Grundlagen der modernen, naturwissenschaftlich orientierten Sinnesphysiologie wurden im letzten Jahrhundert, insbesondere von dem Physiologen Weber und dem Physiker Fechner, erarbeitet. Sie erforschten die Beziehungen zwischen physikalischen Reizveränderungen (z. B. Gewichte verschiedener Größe) zu den dazu korrespondierenden Empfindungsänderungen.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Versuchspersonen (Vp) aufgefordert, zu beurteilen, ob zwei Objekte gleicher äußerer Beschaffenheit gleich oder verschieden schwer sind. In einer Serie diente jeweils ein Gewicht als Bezugs- oder Standardreiz, mit dem eine Reihe von anderen zu vergleichen war. Auf diese Weise wurde der eben noch merkbare Unterschied zwischen Vergleichs- und Standardreiz ermittelt. Weber fand in diesen Versuchen, daß der Quotient aus demjenigen Reizzuwachs, der gerade noch eine Empfindungsänderung bewirkt, und dem Standardreiz konstant ist. Diese Ergebnisse wurden später von Fechner überprüft, und es gelang ihm, zu zeigen, daß zwischen Empfindungsstärke und physikalischer Reizintensität ein logarithmischer Zusammenhang besteht. In der Nachfolge stellte sich heraus, daß das Fechnersche Gesetz nur im Bereich mittlerer Reizstärken Gültigkeit besitzt. Cramer und Plateau formulierten eine neue Beziehung, derzufolge der Quotient aus Empfindungsstärkenzuwachs und schon erreichter Empfindungsstärke proportional zu dem Quotienten aus Reizstärkenzuwachs und bereits erreichter Reizstärke ist. Durch Integration kann hieraus das bekannte Stevensche Potenzgesetz gewonnen werden. Dieses besagt, daß die Empfindungsstärke gleich einer Potenz der Reizstärke ist, wobei der Exponent n abhängig von der Sinnesmodalität und der Sinnesqualität ist.

Aus diesen fundamentalen Untersuchungen entwickelte sich die Psy-

chophysik als Lehre von den Veränderungen der Reizintensität und deren Empfindungsäquivalenten (Rogge, 1981). Heute konzentriert sich das Interesse dieses Wissenszweiges hauptsächlich auf die Bestimmung jener Reizstärke, die appliziert werden muß, damit der Reiz überhaupt bemerkt wird. Diese, sozusagen minimale, Reizintensität bezeichnet man als Schwelle. Im allgemeinen geht man so vor, daß einem Probanden ein Stimulus dargeboten wird, den der Versuchsleiter allmählich abschwächt, bis der Proband angibt, ihn nicht mehr wahrzunehmen. Umgekehrt ist es auch möglich, einen unterschwelligen Reiz in seiner Intensität so lange zu steigern, bis ihn die Vp wahrnimmt.

Diese Verfahren der sogenannten subjektiven Sinnesphysiologie haben den Nachteil, daß sehr viele, durch die subjektive Situation und Gestimmtheit der jeweiligen Vp bedingte, Parameter, wie beispielsweise Müdigkeit, Aufmerksamkeit, körperliche Befindlichkeit usw., unbeachtet bleiben müssen. Zudem kann nicht festgestellt werden, welche psychischen und neuronalen Faktoren zusammenwirken, wenn die Vp ihre Entscheidung fällt.

Im Bemühen um eine objektive Meßmethode zur Schwellenbestimmung versuchte der Erlanger Physiologe Keidel (1964) die Größe neuronaler, von der unverletzten Schädeldecke abgeleiteter Biopotentiale mit der Empfindungsstärke, d. h. genauer gesagt, mit der psychophysischen Schwelle zu korrelieren. Diese, so bezeichneten, evozierten Potentiale werden aus dem Elektroenzephalogramm dadurch gewonnen, daß durch statistische Mittelung alle jene Potentiale eliminiert werden, die nicht mit dem Reiz zeitlich synchronisiert sind. Keidel führte derartige Versuche für drei Sinnesmodalitäten durch, und zwar für akustische Reize, Schmerzreize und Vibrationsreize. Er fand, daß die elektrophysiologisch gemessenen Schwellen sehr gut mit psychophysisch ermittelten übereinstimmen.

Campbell und Maffei (1970) leiteten visuell evozierte Potentiale (VEP) von der menschlichen Schädeldecke ab und demonstrierten, daß der von Keidel beschriebene Zusammenhang auch für optische Reize gültig ist. Sie verwendeten in ihrer, mittlerweile klassisch zu nennenden, Arbeit zur Kontrastempfindlichkeit 8-Hz-phasenalternierende Sinusgitter. Solche Gitter erscheinen als Balkenmuster, deren örtlicher Kontrast sinusförmig variiert, während die durchschnittliche Leuchtdichte konstant gehalten wird. Campbell und Maffei maßen nun für Gitter gegebener Streifenbreite, d. h. fester Ortsfrequenz, die VEP-Amplitude in einem Bereich zwischen 50% und 5% Kontrast. Die so erhobenen Meßwerte wurden in einem Diagramm dargestellt, dessen Abszisse in Einheiten aufgeteilt ist, die dem Logarithmus des Kontrastes entsprechen. Die Ordinate gibt dagegen die VEP-Amplitudenwerte wieder. In einer derartigen Darstellung der Daten zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen "log-Kontrast" und der VEP-Amplitude. Diese Geraden wurden gegen die "Null-Volt-Amplitude" extrapoliert, und ihre Schnittpunkte mit der x-Achse fielen dann in guter Näherung mit den für die gleichen Gitter psychophysisch gemessenen Kontrastschwellen zusammen. In einer anderen Darstellung wurden alle derart elektrophysiologisch bestimmten Schwellen gegen die Streifenbreite der verwendeten Gitter aufgetragen. Es entstand so ein Kurvenzug, der recht gut mit der psychophysisch gefundenen visuellen Kontrastempfindlichkeitsfunktion zur Deckung kam.

Es liegt nun nahe, VEP zu diagnostischen Zwecken zu verwenden, da sie, wie vorgehend kurz skizziert, gut mit psychophysisch gemessenen Empfindungsgrößen korrelieren. Darüber hinaus stellt ihre Messung möglicherweise ein Verfahren dar, das physiologische Veränderungen objektiver erfaßt als andere Methoden. In der Tat werden in der klinischen Praxis zur Diagnosestellung außer somatisch evo-

zierten Potentialen, beispielsweise zur Objektivierung von latenten Sensibilitätsstörungen, akustisch evozierten Potentialen bei Patienten, die einer herkömmlichen Audiometrie nicht zugänglich sind, auch VEP in größerem Umfang verwendet.

Dabei hat sich in der neurologischen und ophthalmologischen Diagnostik die Musterumkehrmethode (pattern reversal) gegenüber dem Gebrauch von unstrukturierten Lichtblitzen mehr und mehr durchgesetzt. Bei diesem Verfahren verwendet man Schachbrettmuster als Stimuli, deren helle und dunkle Anteile - bei konstant gehaltener mittlerer Leuchtdichte - periodisch vertauscht werden. Eine zunehmend größere Rolle spielen die VEP in der Untersuchung und Verifizierung der multiplen Sklerose (MS). In einer 1980 publizierten Arbeit stellte Diener Ergebnisse vor, die er an einem Kollektiv von 63 MS-Patienten ermittelt hatte. Die Erkrankten waren nach den Kriterien von Mc Alpine in drei Kategorien, sichere, wahrscheinliche und mögliche MS eingeteilt worden. Die Ableitungen der VEP wiesen in 91% der ersten, in 90% der zweiten und in 68% der dritten Gruppe pathologische Latenzverzögerungen auf. Solche pathologischen VEP konnten unter anderem auch bei MS-Patienten festgestellt werden, deren ophthalmologischer Befund unauffällig war. Eine Vielzahl von weiteren augen- und nervenheilkundlichen Beschwerdebildern macht sich in Veränderungen der VEP bemerkbar. Es sei stellvertretend auf die Latenzzunahme bei Metalues und verschiedenen zerebralen Speicherkrankheiten, auf die Amplitudenreduktion bei Papillitiden und Retinopathien, sowie auf die Amplitudenerhöhung bei genuiner Epilepsie hingewiesen (Jörg, Hielscher, 1982). Ebenso gelingt die Unterscheidung von kortikaler - (VEP-Verlust) und psychogener Blindheit (VEP unauffällig). Darüber hinaus kann mit Hilfe von VEP eine objektive Refraktionsmessung und die Bestimmung der Achsenlage eines Astigmatismus durchgeführt werden

(Rentschler und Spinelli, 1978). Beeinträchtigungen der Sehschärfe führen bei relativ geringfügigen Latenzverzögerungen zu Amplitudenverlusten der VEP. Untersuchungen am amblyopen Auge (die Amblyopie entspricht einer optisch nicht korrigierbaren Visusherabsetzung) ergaben, daß VEP-Amplitudenunterschiede zwischen beiden Augen bestehen, wobei die Latenzen normal lang ausfallen und die Amplitude des unscharfen Auges reduziert ist (Diener, 1980). In seiner 1982 vorgelegten Dissertation ging Lorbeer der Frage nach, inwieweit VEP geeignet seien, um Amblyopien von Sehschärfeverlusten anderer Genese differentialdiagnostisch abzugrenzen. Die von ihm abgeleiteten VEP wurden von 8-Hz-phasenalternierenden Sinusgittern induziert. Die Meßwerte gelangen auf zweierlei Art zur Darstellung. Zum einen kommt die Amplitudenhöhe gegen die Ortsfrequenz (Maß der Streifenbreite) und zum anderen der Phasengang, d. h., die Latenz oder zeitliche Verzögerung, nach deren Ablauf ein VEP gemessen werden kann, gegen die Streifenbreite zur Auftragung. In der Arbeit zeigt sich vor allem, daß hinsichtlich der VEP-Phasenlage und Amplitudenwerte schon bei normalsichtigen Personen große Schwankungen auftreten. Aus diesem Grund kann eine Aussage über amblyopiespezifische VEP-Alterationen nur schwer gemacht werden. Die in Rede stehende Untersuchung erwähnt als einziges amblyopietypisches Kriterium, daß die Hauptleistung der Signalantwort nicht wie bei normalsichtigen Probanden bei 16 Hz, also der ersten Oberwelle liegt, sondern vielmehr bei 8 Hz, d. h., bei der Grundwelle. Das bedeutet, daß bei Amblyopen die 8-Hz-Amplitude im Durchschnitt größer ist als die 16-Hz-Amplitude.

In Weiterführung der von Lorbeer geleisteten Untersuchungen setzt sich die vorliegende Arbeit zum Ziel, an einer größeren Anzahl von normalsichtigen Beobachtern VEP-Messungen zu erheben. Es soll

unter Anwendung der von Strasburger (1982) entwickelten digitalen "fast-sweep-Technik" geklärt werden, ob und in welchem Umfang die von 8-Hz-phasenalternierenden Sinusgitter induzierten VEP interindividuelle Übereinstimmungen aufweisen und inwieweit einmal gewonnene Meßergebnisse intraindividuell reproduzierbar sind. Die zu untersuchenden Kriterien werden VEP-Amplitude und Phasengang als Funktion der Ortsfrequenz sein. Des weiteren soll der Gitterkontrast als Parameter variiert werden, um seinen Einfluß auf Form, Größe und zeitliche Verzögerung der VEP-Antwort darzustellen. Schließlich sollen den VEP psychophysisch gewonnene Kontrastempfindlichkeitsfunktionen gegenübergestellt werden.

2. Grundlagen

2.1 Aufbau des visuellen Systems

Das abbildende System des Auges, auch als dioptrischer Apparat bezeichnet, ist als Anordnung von Linsen aufzufassen, durch deren Wirkung ein umgekehrtes, verkleinertes Bild auf die Netzhaut (Retina) projiziert wird. Der dioptrische Apparat gliedert sich in Cornea (Hornhaut), Kammerwasser, bikonvexe Linse und Glaskörper. Der Iris obliegt die Regulation der in das Linsensystem einfallenden Lichtmenge. Die Schärfe des retinalen Bildes ist durch die in gewissen Rahmen veränderliche Brechkraft der Linse gewährleistet. Den Vorgang der Brechkraftanpassung nennt man Akkomodation. Die Akkomodation erfolgt durch eine Veränderung der vorderen Linsenkrümmung, die auf einer Kontraktion des zirkulär und radiär die Linse umgebenden Ziliarmuskels beruht.

Die Retina ist entwicklungsgeschichtlich, im Gegensatz zu den anderen Sinnessystemen, ein vorgelagerter Teil des Gehirnes und leitet sich vom Diencephalon ab.

Die auf die Netzhaut einfallenden Photonen treffen auf verschiedene Sinneszellen, die Rezeptoren, von denen es zwei Typen gibt. Es werden Zapfen und Stäbchen unterschieden. Man schätzt die Zahl der Zapfen auf sechs Millionen, die der Stäbchen auf 120 Millionen. Die Zapfen haben ihre größte Dichte in der Umgebung der Fovea - der Stelle des schärfsten Sehens - während ihr Anteil am Gesamtrezeptorenbesatz zur Peripherie hin abnimmt. Über eine Erregung der Zapfen findet das Sehen bei Helligkeit (photopisches Sehen) statt. Sie weisen unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit auf. Es gibt Zapfenarten, die jeweils maximale Erregbarkeit bei den Wellenlängen für rotes, grünes und blaues Licht zeigen. Im Unterschied zu der Anzahl der Zapfen nimmt die der Stäbchen zur Peripherie hin zu. Die Stäbchen - von denen die Fovea völlig frei ist - ermöglichen

vor allem das Sehen bei geringer Lichtintensität. In den retinalen Rezeptorzellen bewirkt die Lichtenergie einen Zerfall der Sehfarbstoffe, bei dem wiederum chemische Energie entsteht, die letztlich den Motor für die Generierung von elektrischen Signalen, sogenannten Aktionspotentialen, bildet.

Die Hauptflußrichtung der Signale verläuft von den Rezeptoren über die Bipolarzellen zu den Ganglienzellen des Nervus opticus. Bipolare Zellen sind Bindeglieder zwischen den Sinneszellen einerseits und den Nervenfasern andererseits, die visuelle Information zentralwärts leiten. Über sie und die sogenannten amakrinen Zellen, die sowohl mit den Bipolarzellen als auch mit den Ganglienzellen vielseitige Synapsen (neuronalen Verbindungsstellen) haben, findet eine erhebliche Signalkonvergenz statt. Das Konvergieren der optischen Information wird vor allem dann deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, daß den ca. 130 Millionen Rezeptorzellen nur etwa eine Million Ganglienzellen gegenüberstehen. Die Signalkonvergenz nimmt in der Peripherie der Netzhaut noch zu. Auf retinaler Ebene kommt jedoch auch Signaldivergenz vor, d. h. eine Rezeptorzelle kann mehreren Opticusfasern Information zuleiten. Insgesamt jedoch überwiegt die Konvergenz, wie aus dem zahlenmäßigen Vergleich von Rezeptor- und Ganglienzellen zu ersehen ist.

Jeder Ganglienzelle im Nervus opticus ist ein sogenanntes rezeptives Feld auf der Netzhaut zugeordnet. Diese rezeptiven Felder, erstmals von Hartline (1940) beschrieben, muß man sich als konzentrische, flächenhafte Anordnung von Rezeptorzellen vorstellen. Dabei sind Zentrum und Peripherie des Feldes antagonistisch organisiert, d. h., die Randzonen hemmen das Zentrum und umgekehrt. Es werden "on-center"- und "off-center"-Felder unterschieden. Wird das "on-center"-Feld in seinem Zentrum beleuchtet, reagiert die

ihm zugeordnete Nervenfasern mit einer Erhöhung der Impulsrate. Fällt jedoch der Lichtreiz auf das hemmende Umfeld, so sinkt die Zahl der Entladungen des betreffenden Neurons ab. Werden beide Gebiete mit Stimuli gleichen Energiegehaltes gereizt, unterbleibt eine Antwort. Reize verschiedener Intensität führen zu einer aus der Summation hemmender und bahnender Impulse resultierenden Reaktion (Kuffler, 1953). Das "off-center"-Feld weist dem entgegengesetzte Eigenschaften auf. Das Zentrum wird erregt durch Abdunkelung, der adäquate Reiz für die Umgebung besteht in einem Anwachsen der Leuchtstärke.

Die visuelle Information wird über den Nervus opticus zu den Corpora geniculata laterales (seitliche Kniekörper) und schließlich über die Radiatio optica (Sehstrahlung) zur primären Sehrinde (Area Brodmann 17) weitergeleitet.

Der nasale (temporale) Anteil des Gesichtsfeldes projiziert jeweils auf die temporalen (nasalen) Retina-Areale beider Augen.

Die Axone der retinalen Ganglienzellen bilden den Sehnerv. Dabei gelangt die jeweils nasale Hälfte der Opticusneurone über die Sehnervenkreuzung (Chiasma opticum) in die kontralaterale Gehirnhälfte. Die temporalen Fasern verlaufen ungekreuzt in die ipsilaterale Hemisphäre.

Der Hauptteil der Opticusfasern endet in den lateralen Kniekörpern, der kleinere Teil der Ganglienzellen erreicht nach Verschaltung in den vorderen vier Hügeln das Gebiet des Prätektums. In den lateralen Kniekörpern, die als erste Relaisstation fungieren, in der auch Einflüsse aus anderen Systemen integrativ verarbeitet werden, findet eine Verschaltung der Opticusfasern mit den Nervenzellen statt, die in der Sehstrahlung die visuelle Information dem Kortex zuführen.

Im visuellen Kortex kommt es zur endgültigen Aufbereitung der op-

tischen Signale. Er befindet sich im Lobus occipitalis (Hinterhauptslappen) des Neokortex. Das Gesichtsfeld ist vollständig auf dem primären visuellen Kortex (Area Brodmann 17) repräsentiert. Dabei nimmt die Repräsentation der Fovea einen ungleich größeren Raum ein als die Peripherie der Netzhaut. Der primären Sehrinde schließt sich beidseits der sekundäre visuelle Kortex (Area Brodmann 18 und 19) an, in dem die Signalverarbeitung fortgesetzt wird. Aufbau und Funktionsweise des visuellen Kortex wurden vor allem durch Hubel und Wiesel bei der Katze (1962) und beim Affen (1977) untersucht und beschrieben. Nach ihnen enthält die Sehrinde sogenannte einfache (simple cells), komplexe und hyperkomplexe Zellen. Einfache Zellen sollen rezeptive Felder bilden, die aus einer längsweise nebeneinanderliegenden Anordnung aus erregenden und hemmenden Arealen in beliebiger Orientierung bestehen. Solche rezeptiven Felder werden maximal von Lichtbalken und Kanten aktiviert, die, bei bestimmter Breite und Lokalisation, parallel zur Längsachse der Feldes verlaufen.

Bei komplexen rezeptiven Feldern spielen nur noch die Grenzen des Reizes eine Rolle, während die Position innerhalb des Feldes weniger Bedeutung hat. Ebenso ist die strenge Trennung zwischen exzitatorischen- und inhibitorischen Feldanteilen aufgehoben.

Hyperkomplexe Zellen kommen hauptsächlich im sekundären visuellen Kortex vor. Ihre Erregung erfordert einen Reiz mit örtlich definierten Kontrastgrenzen, der zugleich eine bestimmte Orientierung inne hat.

Die geschilderten orientierungsspezifischen Zellen liegen nach Hubel und Wiesel (1979) in Säulen übereinander, die senkrecht zur kortikalen Oberfläche stehen. Diese Säulen entstehen aus Neuronen verschiedenen Typs aber gleicher Orientierungsspezifität und gleicher retinaler Projektion. Desweiteren berichten diese Autoren, daß, betrachtet man eine Ebene, die parallel zur Rindenoberfläche

verläuft, die Orientierungsspezifität sich in der einen Richtung ändert, die Augendominanz in der anderen.

Die Verarbeitung der visuellen Information beschränkt sich jedoch nicht auf den primären und sekundären Kortex. Durch Ablationsexperimente konnte nachgewiesen werden, daß z. B. auch die Areae Brodmann 20 und 21 in der Verarbeitung der visuellen Information eine Rolle spielen. Die genaue Zahl und Gliederung der intrakortikalen Zentren, die in Verbindung mit dem Sehsystem stehen, ist jedoch noch weitgehend unbekannt.

Für eine Übersicht über Bau und Funktionsweisen des visuellen Systems sei auf "Grundriß der Sinnesphysiologie" (Schmidt, 1980) verwiesen.

2.2 Zur Entstehung und Meßtechnik der evozierten Potentiale

Evozierte Potentiale (EP) sind elektrische Biosignale, die nach adäquater Reizung von der uneröffneten Schädeldecke abgeleitet werden können. Ihre Form und ihr Verlauf werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. So spielen unter anderem die makroskopischen, geometrischen Bedingungen der Hirnrinde ebenso wie die Gestalt der kortikalen Zellen, ihre verschiedenen Ein- und Ausgänge und die Lage der Stromquellen zueinander eine Rolle. Obwohl die Methode der EP aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken ist, ist eine vollständige, zufriedenstellende Erklärung ihrer Genese bis heute nicht gelungen. Tierexperimentelle Studien weisen darauf hin, daß nicht Aktions-, sondern postsynaptische Potentiale den Hauptbeitrag zur Entstehung der VEP leisten (Creutzfeld und Kuhnt, 1967, 1973). Demnach sollen EPSP und IPSP gleichermaßen zu den EP beitragen. In den Arbeiten von Kelly und van Essen (1974) wird darauf hingewiesen, daß auch Gliazellen zur kortikalen Gesamterregung beitragen. Die Generatoren der EP-Antworten sollen in den primären Rinden der jeweiligen Sinnesmodalität gelegen sein (Regan, 1972).

EP-Amplituden sind sehr klein. Sie bewegen sich in der Regel bei VEP in einem Bereich von 5 - 10 Mikrovolt. Bei akustisch evozierten Hirnstammpotentialen können sie sogar weniger als 0,5 Mikrovolt betragen. Reizantworten einer so geringen Größenordnung sind im spontanen EEG-Signal nicht erkennbar. Es wird deshalb mit Hilfe spezieller Techniken versucht, die EP "sichtbar" zu machen.

Bei der Messung von VEP unterscheidet man zwischen stationärer ("steady-state") und phasischer (transienter) Reizung (Regan, 1966). Phasische Stimuli folgen in Pausen solcher Länge aufeinander, daß das visuelle System in dem jeweilig reizfreien Intervall

seine Ausgangslage wieder erreichen kann. Die interponierte, reizlose Zeitspanne muß mindestens 600 Millisekunden betragen, da ansonsten der phasische in einen - "steady-state" - Modus übergeht. Dahingegen werden stationäre Stimuli in so rascher Aufeinanderfolge dargeboten, daß die betroffenen Neuronen keine Zeit zur Erholung haben. Die Aufzeichnung von VEP mittels des "steady-state"-Verfahrens beschreibt das visuelle System im quasi eingeschwungenen Zustand. Amplituden- und Phasenwerte sind, bezogen auf den jeweiligen Stimulus, stationäre Größen. Im Gegensatz dazu ist die phasische Reizantwort als einmaliger Erregungsvorgang in seinem zeitlichen Ablauf zu interpretieren.

Im Falle der phasischen VEP zeichnet man das Signal mit einem elektronischen Mittelwertsbildner ("averager") auf und verbessert so das Signal/Rauschverhältnis. Nach jedem Reiz mißt der "averager" während einer bestimmten Zeitspanne das EEG-Signal. Durch Addition der einzelnen Signalabschnitte summieren sich die zu den Stimuli in zeitlicher Beziehung stehenden Antwortpotentiale, wohingegen sich die Komponenten des Spontan-EEG's, die in einer Zufallsverteilung auftreten, gegenseitig aufheben. Im Anschluß an die Summierung der Signalabschnitte wird das Ergebnis vom Mittelwertrechner durch die Anzahl der Messungen dividiert und so der Mittelwert gebildet.

Wie oben schon erwähnt, werden stationäre VEP durch periodische Reizung mit einem gleichbleibenden Stimulus erzeugt. Solche, mit einer bestimmten zeitlichen Frequenz F Hz periodisch auftretende, Reize regen das visuelle System zu einem Schwingungszustand an, der durch die Grundwelle von F Hz und die dazugehörigen harmonischen - oder Oberwellen von $2F$ Hz, $3F$ Hz, $4F$ Hz, usw. gekennzeichnet ist. Dazu ist anzumerken, daß dieser steady-state-Zustand sich erst einige Zeit, nachdem die repetitive Reizung

begonnen hat, einstellt (Van der Tweel, 1965, Regan, 1966). Die erwähnten Frequenzkomponenten, sowie ihre Amplituden und Phasenwerte, lassen sich durch Fouriertransformation des Zeitsignals (Darbietungshäufigkeit des Stimulus pro Zeiteinheit) in den Frequenzraum bestimmen.

Lineare Systeme können sowohl mit transienten als auch mit steady-state-Verfahren zufriedenstellend beschrieben werden. Das visuelle und auditive System zeigen jedoch in vielerlei Hinsicht nicht lineares Verhalten. Dabei ist es ohne weiteres möglich, daß sich aufeinanderfolgende Reizantworten nicht einfach aufsummieren, sondern in irgendeiner anderen Weise anwachsen. Im Prinzip können aber "steady-state"- und transiente Stimulation eines bestimmten sensorischen Systems einander ergänzende Information bieten (Regan, 1966).

In der vorliegenden Arbeit fanden ausschließlich die stationären VEP Anwendung. Diese Art der VEP-Messung bietet den Vorteil, daß sie lediglich gering durch Aufmerksamkeitsschwankungen beeinflusst wird. Transiente VEP eignen sich dem gegenüber besonders gut dazu, Aufmerksamkeitsveränderungen und Orientierungsverhalten zu untersuchen. Bei stationären VEP fallen die Amplituden im allgemeinen niedriger aus als bei phasischen Potentialen. Desweiteren scheinen die beiden Verfahren unterschiedliche Aspekte demyelinisierender Krankheiten zu beschreiben (Regan und Heron, 1974).

Die Nichtlinearität des visuellen Systems macht eine möglichst konsequente Einhaltung einmal festgelegter Versuchsbedingungen erforderlich. Es ist durch einfache Superposition einzelner Testparameter nicht vorhersagbar, wie sich das System unter einer veränderten Testanordnung verhält. Die Anordnung der Elektroden auf der Schädeldecke hat einen erheblichen Einfluß auf Form und Größe der VEP (Tyler, Apkarian, Nakayama, 1978). Es ist also sorgfältig auf

die Konstanz der Elektrodenpositionierung zu achten. Der Übertragungswiderstand der Elektroden sollte 5 k Ω nicht übersteigen. Ebenfalls von erheblicher Bedeutung ist der Sehwinkel, unter dem die Testmuster erscheinen. Zu große Testfelder sollen eine Abnahme der VEP-Amplituden bewirken, da die retinale Peripherie eine Hemmungswirkung ausübt (Lorbeer, 1982).

Nach Rudolph (1980) tragen hauptsächlich foveal liegende Neuronen zur Entstehung transienter VEP bei Schachbrettmuster-Stimulation bei. Der Retinaperipherie wird nur ein Anteil von 10% - 20% an der Potentialgenese zugeschrieben. In Arbeiten von Henerici et al. (1977) wird die Behauptung erhoben, foveale Bahnen leiteten im Vergleich zur Retinaperipherie deutlich langsamer. Solche unterschiedlichen Leitungsverhältnisse könnten - bei einer Restfeldgröße, die beide Neuronenpopulationen stimuliert - die Form der VEP-Amplituden erheblich beeinflussen.

In der Mitte des Testfeldes wird ein Fixationspunkt angebracht, da die Fixation des oberen oder unteren Randes des Musters zu jeweils unterschiedlichen Latenzen und Amplituden führt. Der Beobachter sollte während des Experimentes ruhig und entspannt sitzen. Er sollte heftige Bewegungen vermeiden und nicht sprechen, da dies Muskelartefakte hervorrufen kann. Die Ableitungen sollten in einem abgedunkelten Raum mit konstanter Hintergrundleuchtdichte erfolgen. Es ist sicherzustellen, daß eventuell bestehende Refraktionsanomalien durch entsprechende optische Maßnahmen voll ausgeglichen sind.

In der vorliegenden Arbeit werden bei allen Experimenten 8-Hz-phasenalternierende Sinusgitter verwendet, die den Vorteil einer gut definierten Orientierung aufweisen. Außerdem können sie nicht in einfachere Musterelemente zerlegt werden (Lorbeer, 1982).

3. Versuchsdurchführung und Auswertung

3.1 Testfeld und Testmuster

Bei allen Experimenten, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, war das Testfeld kreisförmig. Das dunkle Umfeld auf dem Schirm des Displays war von einer mäßig beleuchteten weißen Blende bedeckt. Bei sämtlichen Messungen erschienen die Muster unter 5° Gesichtswinkel, was einem Beobachtungsabstand von 128 cm entspricht. Diese Testfeldgröße erfaßt sowohl die Fovea, also die Stelle des schärfsten Sehens, als auch die sie umgebende Retina, wodurch in der Regel die Amplituden der VEP vergrößert werden. Dieses Anwachsen der Reizantwort ist durch die gleichzeitige Aktivierung einer ausgedehnteren Neuronenpopulation zu erklären, deren Einzelsignale sich wechselseitig verstärken. Bei allzugroßen Testfeldern soll jedoch, wie bereits erwähnt, eine Reduktion des Antwortsignals zu beobachten sein, die durch antagonistische Reaktionsweisen von Fovea und Peripherie erklärt werden kann (Lorbeer, 1982).

Als Testmuster dienten 8-Hz-phasenalternierende Sinusgitter (siehe Abb. 1).

Die Wahl fiel auf diese Zeitfrequenz, da, wie aus vielen Veröffentlichungen ersichtlich, zahlreiche Arbeitsgruppen 8-Hz-phasenalternierende Muster verwendeten. Eine bessere Vergleichbarkeit soll so ermöglicht werden. Jörg (1984) behauptet, 8 - 9 Hz stellen die optimale Reizfrequenz für "steady-state"-Stimulation dar, da bei einer solchen Frequenz die VEP-Amplituden am besten bestimmbar seien. In einigen Publikationen werden Versuche mit sinusförmig modulierten, homogenen Kreisflächen bei transientem Stimulationsmodus beschrieben, die zum Ergebnis hatten, daß das Maximum der Signalamplitude bei etwa 12 Hz Zeitfrequenz auftrete (Van der Tweel und Verduyn, 1965, Spekrijse, 1966).

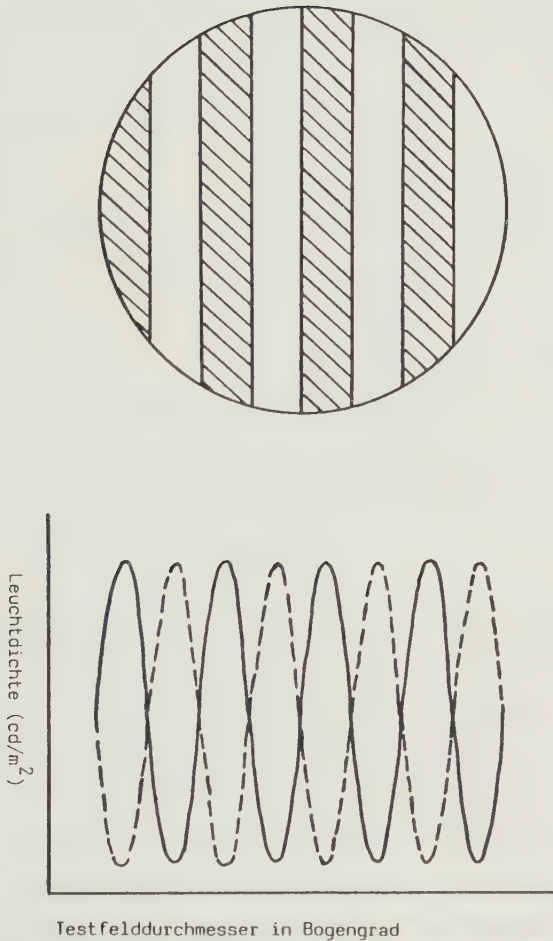


Abb. 1: Das Schaubild zeigt schematisch, das bei den Untersuchungen verwendete Testfeld. Das kreisförmige Testmuster erscheint in einem weißen Umfeld. Der untere Teil der Abbildung zeigt einen sinusförmigen Verlauf des Musters. Bei konstant gehaltener mittlerer Leuchtdichte werden Wellen und dunkle Anteile des Musters periodisch vertauscht. Der strichlierte Kurvenzug zeigt den Kontrastverlauf nach einer halben Periode (Lorbeer, 1982).

Einschränkend sei jedoch neuerer Arbeiten Erwähnung getan, in denen eine beträchtliche Variabilität der VEP-Amplitude bezüglich der temporalen Reizfrequenz nachgewiesen wird (Tyler, Apkarian und Nakayama, 1978).

Wie bereits bemerkt, antwortet das visuelle System auf Stimulation hauptsächlich mit der doppelten Signalfrequenz, also der Muster-Umkehr-Frequenz. Die Signalantwort liegt also im Falle einer zeitlichen Reizfrequenz von 8 Hz mit 16 Hz im wesentlichen zwischen alpha-(8 - 12 Hz) und beta-Band (bis 28 Hz) des EEG's. Somit ist eine Verfälschung des VEP von seiten spontaner, rhythmischer Hirnaktivitäten nicht zu erwarten.

Der Kontrast der phasenalternierenden Sinusgitter betrug, wenn nicht anders angegeben, bei den Messungen 40%.

Der photometrische Kontrast C ist definiert als:

$$C = \frac{I_{\min} - I_{\max}}{I_{\max} - I_{\min}} \times 100\%$$

Dabei entspricht $I_{\min}$ der minimalen, $I_{\max}$ der maximalen Leuchtdichte des auf dem Bildschirm dargebotenen Reizes.

Der Kontrast wurde auf diesen Wert festgelegt, da in einigen Veröffentlichungen (z. B. Sokol, 1980) darauf hingewiesen wird, daß bei ca. 30% Kontrast eine Sättigung auftritt. Zu hohe Kontrastwerte sollen zudem die Ermüdung der Probanden beschleunigen (Jörg, Hielscher, 1982). Die Einflüsse sehr hoher Kontraste auf die VEP-Amplitudenhöhe und die zeitlich engmaschige Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sind im Rahmen dieser Arbeit untersucht worden (siehe Voruntersuchungen).

Im abgedunkelten Versuchsraum betrug die mittlere Leuchtdichte des Sichtgerätes abhängig von dessen Typ entweder 8 cd/m^2 (HP-1304 A) oder 17 cd/m^2 (HP-1310 A). Der Beobachter befand sich bei den Ver-

suchen, wenn nicht anders angegeben, in einem Abstand von 128 cm vom Bildschirm. Es wurden ihm 18 Sinusgitter dargeboten, die bei dieser Entfernung Ortsfrequenzen folgender Werte annahmen:

0,5 0,6 1,0 1,3 1,6 2,0 2,5 3,2 4,0 5,0 6,3 8,0 10,1
12,7 16,0 20,1 25,4 Per/Grd.

3.2 Apparatur

Zur Stimulusdarbietung wurde entweder Hewlett-Packard HP-1304 A- oder ein HP 1310 A-Kathodenstrahlrohr-Display verwendet.

Die Probanden befanden sich zusammen mit dem Display, vom Versuchsleiter getrennt, in einem abgedunkelten Raum. Der Experimentator hatte jederzeit die Möglichkeit sowohl das Display als auch die Versuchsperson zu beobachten. Gespräche, die Anwesenheit von anderen Personen und Geräusche, welche die Aufmerksamkeit von Probanden beeinträchtigen konnten, wurden weitgehend vermieden.

Am y-Eingang des Displays liegt eine hochfrequente Dreiecksspannung von etwa 10^5 Hz, der x-Eingang wird von einem Rampengenerator beschickt, welcher der Steuerung des Laborrechners unterliegt und eine Sägezahnspannung von 64 Hz erzeugt. Die phasenalternierenden Sinusgitter kommen durch Modulation des z-Eingangs zustande. Das z-Signal wird vor Beginn der Sitzung für jede der 18 zu zeigenden Ortsfrequenzen vom Laborrechner erstellt und in dessen erweitertem Gedächtnis für den späteren Abruf bereitgehalten. Die Stimuli erscheinen in einer Reihe aufsteigender Ortsfrequenzen auf dem Bildschirm. Jedes Sinusgitter wird zwei Sekunden gezeigt. Ist die höchste Ortsfrequenz erreicht (25,4 cpd), verläuft der Vorgang in umgekehrter Richtung bis zur niedrigsten Ortsfrequenz (0,5 cpd). Dieses Auf- und Abfahren der Ortsfrequenzskala wird dreimal wiederholt. Man bezeichnet eine solche Methode als sweep- oder, zu deutsch, als Wobbeltechnik. Autor der Reizerzeugungsprogramme (RGEN) und des Programmes EVPOT, das den Versuchsablauf steuert, die Daten aufzeichnet und die vorbereiteten Stimuli darbietet, ist Strasburger (1982).

Sowohl das Programm RGEN als auch EVPOT ermöglicht in gewissem Rahmen eine Variation der Versuchsbedingungen. So können mit RGEN in Abhängigkeit des Abstandes der Versuchspersonen vom Display auch

andere als die in 3.1 genannten Ortsfrequenzen bereitgestellt werden. Die obere Grenze von 25,4 cpd und die untere Grenze von 0,5 cpd sind jedoch durch das Programm vorgegeben. EVPOT erlaubt eine Veränderung der Reizdarbietungsdauer, eine variable Anzahl Stimuli (jedoch nicht mehr als 18) und die Auswahl, welche der erzeugten Reize (z. B. jeder dritte) tatsächlich gezeigt werden soll. Die zeitliche Reizfrequenz betrug bei allen Versuchen 8 Hz. Diese Stimulationsrate - aufrechtzuerhalten für eine Dauer von je zwei Sekunden - hat sich in vielen Versuchen bewährt. Zu Beginn einer jeden Einzelreizdarbietung werden die ersten EEG-Segmente verworfen, um ein Einschwingen des visuellen Systems vor der Datenerfassung sicherzustellen.

Die vom Schädel der Beobachter abgeleiteten Potentiale werden einem physiologischen Vorverstärker (Princeton PAR 113) zugeführt. Der Verstärkungsfaktor beträgt 500. Sie durchlaufen einen Bandpaßfilter, der durch die Eckfrequenzen 3 und 25 Hz gekennzeichnet ist. Da die Hauptlast des Signals bei 16 Hz liegt, ist mit einer Verfälschung der VEP-Antwort nicht zu rechnen. Durch die Unterdrückung niedriger Frequenzen kommen aliasing-Phänomene nicht zum tragen. Die Aussparung höherer Frequenzbereiche verhindert Störungen, die z. B. von der ubiquitären 50 Hz-Netzspannung herrühren.

Schließlich erreicht das Signal via A-D-Wandler den Laborrechner Minc 11-23, einer Variante des LSI 11-23-Microcomputers mit einem 256 kByte-Speicher. Als Betriebssystem fungiert das RT-11 (V4). Das periphere Speichermedium wird von einem Floppy-Disk-Doppellaufwerk gestellt (8" double-density-floppy-disk). Eine Floppy findet Verwendung als System- und Programmdiskette, die andere dient zur Speicherung der Meßdaten.

Die Versuchssteuerung und -auswertung kann von einem Video-Terminal aus betrieben werden. Es hat sich als nützlich erwiesen, das

EEG der Versuchspersonen, über die ganze Dauer der Sitzung, auf einem Oszillographen darzustellen. Auf diese Weise können Störquellen, wie sie beispielsweise durch eine Lockerung der Elektroden entstehen, rechtzeitig aufgedeckt und beseitigt werden.

3.3 Anmerkung zu Meßvorgang und Elektrodenplatzierung

Die Aufzeichnung des EEG's erfolgte über eine bipolare Ableitung. Dabei befestigte man die beiden Elektroden auf der Medianlinie des Schädels, welche Nasion und Inion verbindet. Als Nasion bezeichnet man den Punkt über der Nasenwurzel, das Inion ist eine Erhabenheit auf der Hinterhauptsschuppe. Die differenten Elektroden wurden zum einen 2 cm über dem Inion zum anderen auf den Übergang zwischen erstem und zweitem Drittel der Medianlinie angebracht. Eine dritte, am Ohr läppchen befestigte Elektrode, diente als Referenzelektrode. An beiden Elektrodenpositionen wurden die Haare abgeschnitten. Dadurch ließ sich der Übergangswiderstand verkleinern und die Haftbarkeit der Elektroden erhöhen. Es bewährte sich, die von den Haaren befreiten Hautpartien mit Sandpapier aufzurauen, vor allem um die Hornschichten der Haut zu entfernen. Das Auftragen von Omni-Rep, einer Paste, die in der EEG-Diagnostik Verwendung findet, diente der Reinigung und Auflockerung der entsprechenden Hautstellen. Die Goldelektroden (Typ Grass) wurden mit Elektrodencreme (Grass-EC2) aufgebracht. Das Ablösen der Elektroden verhinderte ein eigens zu diesem Zweck verfertigtes Lastexband, das einem Stirnband, mit einem dritten über die Schädelmittellinie verlaufenden Streifen, gleicht. Als Ohrelektrode fungierte eine einfache Silberklipselektrode. Der Übergangswiderstand betrug bei keiner Messung mehr als 5 kOhm. Die Befestigung der Elektroden erforderte in etwa 30 Minuten. Während dieser Zeit konnte interessierten Probanden Ziel und Aufbau des Experiments erklärt werden. Anschließend betrat der Proband den abgedunkelten Versuchsraum. Vor dem Beginn der eigentlichen Messung hatte die Vp Zeit zur Dunkeladaption. Die Vpn erhielten die Anweisung, während der Reizvorführung möglichst keine heftigen Bewegungen zu machen und nicht zu sprechen, da dies störende Muskelartefakte herbeiführen könnte.

Bei einer Reizdarbietungszeit von zwei Sekunden, einer ebenso langen Pause zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stimuli und 18 Ortsfrequenzen, ergab sich eine Dauer von ca. sieben Minuten je Versuch. Zwischen den einzelnen Experimenten lagen ausreichende Ruhepausen, da, wie noch zu zeigen sein wird, zu dicht aufeinanderfolgende Versuchsdurchgänge zu Ermüdungserscheinungen führen.

Eine Sitzung bestand aus 4-5 Experimenten mit teilweise verschiedenen Kontrasten. Jeder Versuch begann mit der Bestimmung des Rauschpegels. Dazu schloß der Beobachter die Augen, während ein Reiz auf dem Display erschien. So sollte die Spontanaktivität des Gehirns im Bereich der betrachteten Signalfrequenzen ermittelt werden. Alle begleitenden Arbeiten miteingerechnet, erstreckte sich eine Sitzung etwa über 2,5 Stunden.

3.4 Messung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion (CSF)

In der Psychophysik sind vor allem drei Verfahren zur Schwellenbestimmung gebräuchlich (zur Definition der Schwelle siehe Seite 1 dieser Arbeit). Eine Vorgehensweise besteht darin, die Vp anzuweisen, den Schwellenwert selbst einzustellen. Das kann z. B. so aussehen, daß der Proband den Kontrast eines nicht sichtbaren optischen Reizes so lange verstärkt, bis er ihn schließlich registriert. Eine andere Methode verlangt von der Vp die Entscheidung, ob sie einen dargebotenen Stimulus wahrgenommen hat oder nicht. In der vorliegenden Arbeit wurde auf ein drittes Verfahren zurückgegriffen. In diesem bietet man dem Probanden simultan oder zeitlich hintereinander einen Reiz und einen Kontrollreiz dar. Der Beobachter muß entscheiden, welcher der beiden Stimuli der "Zielreiz" ist (Zwei-Alternativen-Forced-Choice-Verfahren). In den hier zu beschreibenden Experimenten kam einem eben noch sichtbaren, also überschwelligem Sinusgitter bestimmter Ortsfrequenz, die Eigenschaft des Zielreizes zu. Reiz und Kontrollreiz wurden zeitlich aufeinanderfolgend gezeigt. Es handelte sich also um ein zeitliches Forced-Choice-Verfahren. Der Kontrollreiz bestand in einem nicht sichtbaren Gitter. Es wurde über alle zur Verfügung stehenden Ortsfrequenzen gemessen (siehe dazu 3.1). Für die Schwellenwertmessung wurde ein Programmpaket von Harvey jr (1982) eingesetzt. Darin werden Zwei-Alternativen-Forced-Choice- und Staircase-Methode verknüpft. Beim Staircase-Verfahren wird nach jeder Messung eine Schätzung des Schwellenwertes durchgeführt. Ausgehend von einem am Anfang z. B. weit überschwelligem Reiz, den die Vp richtig erkennt, wird der Kontrast von Durchgang zu Durchgang gesenkt, bis der Proband bei einem unterschwelligem Stimulus die falsche Antwort gibt. Daraufhin wird erneut ein überschwelliger Reiz dargeboten. Die gezeigten über- und unterschwelligen Stimuli oszillieren

sozusagen mit immer kleiner werdenden Amplituden um den tatsächlichen Schwellenwert. Das Verfahren wird abgebrochen, wenn eine vorgegebene statistische Verlässlichkeit der Schätzung dieses Schwellenwertes erreicht ist. In der graphischen Darstellung wird dann der Kehrwert des für die jeweilige Ortsfrequenz bestimmten minimalen, gerade noch sichtbaren Kontrastwertes gegen das Spektrum der Ortsfrequenzen aufgetragen. Zur Darbietung der Stimuli diente ein Philips Oszilloskop (PM 3211), dessen durchschnittliche Leuchstärke für sämtliche Messungen 8 cd/m^2 betrug.

3.5 Methoden der VEP-Bestimmung und Auswertung

3.5.1 Grundlegende Anmerkungen

Eine der grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Erhebung von VEP ergibt sich aus deren, im Vergleich zum Spontan-EEG, geringen Grösse. Das Gesamt-EEG muß, was die VEP anbelangt, als Hintergrundrauschen betrachtet werden, welches das zu untersuchende Signal um etwa das 50-fache an Amplitudenhöhe übertrifft. Dieses ungünstige Signal/Rauschverhältnis kann mit Hilfe der Signalmittelungstechnik (averaging) erheblich verbessert werden. Unter der Voraussetzung der statistischen Unabhängigkeit des Signals von der elektrophysiologischen Daueraktivität des Kortex gilt die mathematische Beziehung:

$$\frac{S}{R} \times \sqrt{N} = \frac{S'}{R'}$$

Dabei steht S für Signal, R für Rauschen und N für die Anzahl der Messungen. S'/R' stellt das mit steigender Anzahl der Messungen immer günstiger werdende S/R-Verhältnis dar. Eine Verdoppelung der Messungen kommt jeweils einer Verbesserung des S/R-Faktors um 40% gleich. Um also nach zwei Meßvorgängen eine 40-prozentige Vergrößerung des Faktors zu erreichen, sind lediglich zwei zusätzliche Werte nötig. Die gleiche Verbesserung nach 500 bereits erfolgten Ableitungen erfordert also eine ebenso große Menge weiterer Daten. Daraus geht unmittelbar hervor, daß das averaging mit wachsender Anzahl der Mittelungen zusehends uneffektiver wird. Man versucht daher bei der Gewinnung der VEP das Ausgangs-S/R-Verhältnis so günstig wie möglich zu halten.

Bei den, im Falle dieser Arbeit, abgeleiteten stationären VEP werden EEG-Segmente der zeitlichen Periode T gemessen. Ein Synchronisationspuls bewirkt das Auftreten der Testmuster auf dem Bildschirm

und startet gleichzeitig die Aufzeichnung des EEG's.

Nach Mittelung der Meßwerte haben sich die ungerichteten kortikalen Potentialschwankungen gegenseitig aufgehoben und das Signal erscheint nun periodisch mit einer Frequenz $f_0 = 1/T$. Es darf gemäß der Fouriertheorie als unendliche Summe von Sinus- und Cosinus-Schwingungen der Frequenz f_0 und ihrer Vielfachen aufgefaßt werden:

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n \omega_0 t$$

Die Grundfrequenz ist durch die Periode T der Zeitfunktion gegeben, wobei

$$\omega_0 = 2 \pi f_0 = \frac{2 \pi}{T}$$

gilt. Außer dem Gleichanteil A_0 und der Grundfrequenz f_0 mit den Koeffizienten A_1 und A_2 finden sich also die Frequenzen $2 f_0$, $3 f_0$ mit den Koeffizienten A_2 , B_2 ; A_3 , B_3 ... A_n , B_n ... Da es sich um ganz bestimmte Frequenzen, nämlich eben um f_0 und ihre ganzzahligen Vielfachen, handelt, spricht man von diskreten Frequenzen und einem diskreten Spektrum. Im Gegensatz hierzu tauchen im spontanen EEG alle möglichen Frequenzen auf, die sich über ein sogenanntes kontinuierliches Spektrum ausbreiten. Siehe dazu Abb. 2.

Es ist ohne weiteres möglich das ursprüngliche Zeitsignal wieder aus den einzelnen Spektralkomponenten zu rekonstruieren (Abb. 3). Man spricht dann in der Fouriertheorie von Rücktransformation.

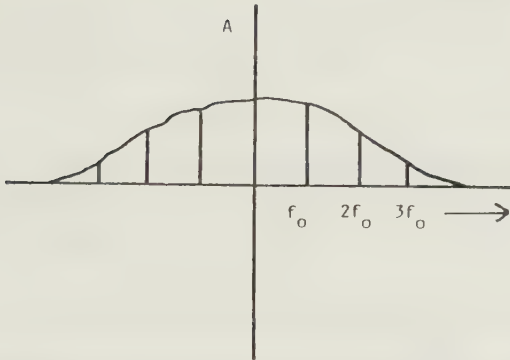


Abb. 2:

Darstellung der signalkorrelierten Anteile des diskreten - vor dem Hintergrundrauschen des kontinuierlichen Spektrums. Die vertikalen Linien stehen für die Frequenz der Grund- und Oberwellen. Das Rauschen wird durch die unregelmäßige Linie symbolisiert (Marko, 1977).

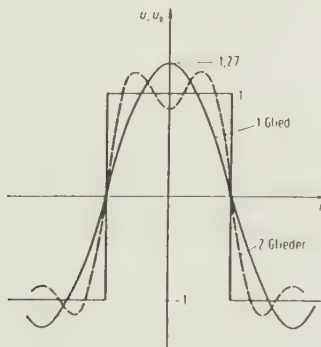


Abb. 3:

Rekonstruktion der zeitlichen Rechteckschwingung aus den harmonischen Spektralkomponenten (Marko, 1977).

3.5.2 Stimuluserzeugung

Die Stimuli, 8-Hz-phasesalternierende Sinusgitter, werden zu Beginn jeder Sitzung vorbereitet. Durch das Reizgenerierungsprogramm, dessen Autor Strasburger ist, wird digital eine einzelne Sinusschwingung guter Auflösung erzeugt. Man erhält die diversen Ortsfrequenzen dadurch, daß dieses Muster mit verschiedenen Phasenwinkeln abgetastet und beispielsweise nur jeder zweite oder dritte Wert abgegriffen wird. Ebenso kann jede Koordinate der Musterkurve mit einem beliebigen Faktor multipliziert oder dividiert werden. Die Reize verbleiben bis zu ihrem Gebrauch im Arbeitsspeicher des Laborrechners. Zur Vorführung werden die vorbereiteten Stimuli mit hoher Geschwindigkeit abgetastet und über einen Digital-zu-Analog-Wandler in den Z-Eingang der Kathodenstrahlröhre gespeist. Dort erscheinen sie mit einer Einzelbildrate von 64 Hz. Diese Bildrate bot sich an, weil 64 Hz über der Verschmelzungsfrequenz liegen und so für das Auge stabile Muster entstehen.

Da der Kontrast der Sinusgitter über eine Periode von 125 ms (8 Hz) variiert, sind bei der benutzten Bildfrequenz jeweils acht Abtastungen pro Sinusschwingung möglich. Mithin sind also Bildwiederholungsrate und Abtastrate identisch.

Die höchste zeitliche Modulationsfrequenz ist von der Nyquistfrequenz abhängig, die in diesem Fall das 0,5-fache der Bildrate, also 32 Hz, beträgt. Dies ist deshalb so, weil zur eindeutigen Bestimmung eines Sinussignals grundsätzlich zwei Meßpunkte vorhanden sein müssen. Als Modulationsfrequenzen kommen nur ganzzahlige Teiler der Bildwiederholungsrate in Frage (hier z. B. 64 Hz : 4 $\rightarrow$ 16 Hz; 64 Hz : 8 $\rightarrow$ 8 Hz usw.). Andere, nicht ganzzahlige Teiler, würden Zeitfrequenzen ergeben, die ein Phänomen herbeiführten, das

man als aliasing bezeichnet. Dies läßt sich anschaulich mit Hilfe der Ungleichung

$$\Delta T < \frac{1}{2B}$$

belegen (Flechtner, 1970). Als ΔT bezeichnet man das sogenannte Nyquist-Intervall, während B die Bandbreite des Signals angibt. Träte der Grenzfall

$$\Delta T = \frac{1}{2B}$$

ein, würden nur die Nulldurchgänge des periodischen Signals, also überhaupt nichts gemessen werden.

Für

$$\Delta T > \frac{1}{2B}$$

würden die zwei benötigten Meßintervalle nicht ganz in eine Periode passen und das Signal schiene verlängert. Beim aliasing werden somit durch eine zu geringe Anzahl der Meßpunkte in einem hochfrequenten Signal niederfrequente Komponenten vorgetäuscht.

3.5.3 VEP-Auswertung

In den vorliegenden Untersuchungen werden die VEP-Analyse von zwei Auswerteprogrammen (Strasburger, 1982) bewältigt. Die Verarbeitung der Daten erfolgt bei beiden Methoden in drei Schritten. Auf dem Display gelangt jeder Stimulus einer bestimmten Ortsfrequenz je sechsmal zwei Sekunden lang zur Vorführung. Wegen der zeitlichen Frequenz von 8 Hz treten dadurch im EEG 96 reizkorrelierte Potentialschwankungen auf. In dem einen Verfahren wird im Anschluß an die Einzelreizdarbietung der Mittelwert gebildet, aus dem sich wiederum durch Fourieranalyse Amplitude und Phase des Signals errechnen. Diese Prozedur läuft sechsmal - jeder Reiz wird ja so oft ge-

zeigt - ab. Am Ende steht die Bestimmung der mittleren Amplitude und des mittleren Phasenwinkels aus den sechs Einzelwerten. In der Abfolge des anderen Auswerteprogrammes nimmt die Spektralanalyse die letzte Stelle ein. Es kommt vor Durchführung der Fourieranalyse zu einer Mitteilung über sämtliche 96 Messungen und das Resultat besteht in einem einzigen Amplituden- und Phasenwert. Dieses Vorgehen erlaubt, im Gegensatz zu dem vorher beschriebenen, keine Angabe von Standardabweichungen.

Man muß sich die Ausgangsgrößen der Spektralanalyse als Vektoren vergegenwärtigen, von denen ein jeder mit einer bestimmten harmonischen Frequenzkomponente korrespondiert. Der Winkel, den ein solcher Vektor mit der Abzisse einschließt, entspricht der zeitlichen Latenz. Diesem Modell zufolge darf man sich vorstellen, daß durch die erste Methode die mittlere Länge dieses Vektors, also eine skalare Größe, berechnet wird. Die zweite Methode läßt sich als Vektoraddition begreifen, bei der sich in verschiedene Richtungen zeigende Potentialvektoren aufheben. Daraus wird unmittelbar verständlich, daß sich durch den ersten Auswertungsmodus grössere Amplituden ergeben als durch den zweiten.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß besonders die Phasenwerte einer kritischen Beurteilung unterzogen werden sollten. Bedient man sich nämlich des Vektormodells, sieht man ohne Schwierigkeit ein, daß eine Verschiebung um den Betrag von 2π in jedem Drehsinn nichts an dem Phasenwinkel und damit der zeitlichen Verzögerung ändern würde. Deshalb müssen die Latenzunterschiede zwischen VEP verschiedener Ortsfrequenz mit Vorbehalt betrachtet werden.

Bei allen im weiteren zu diskutierenden Versuchsergebnissen erfolgt die Darstellung der Phasenwinkel so, daß der nach entsprechender unterbliebener oder stattgehabter Verschiebung um 2π aufgetragene

Wert die geringste Latenzänderung hinsichtlich des vorausgehenden Meßpunktes ausdrückt.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Voruntersuchungen

Wie in der Einleitung erwähnt, hat die Positionierung der Elektroden einen beträchtlichen Einfluß auf Form und Größe der VEP. In diesem Zusammenhang sei vor allem auf die Arbeit von Tyler, Apkarian und Nakayama (1978) Erwähnung getan. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche wurde darauf verzichtet, mit verschiedenen Elektrodenplatzierungen zu experimentieren. Die eingangs angesprochenen Arbeiten befassen sich zudem mit dem Einfluß der zeitlichen Frequenz auf die VEP. Es wird gezeigt, daß die VEP-Amplituden in Abhängigkeit der Reizfrequenz zum Teil stark divergieren.

Schon zu Beginn der Voruntersuchungen zeigte sich rasch, daß weibliche Vpn zum Teil erheblich größere VEP-Amplituden aufweisen als männliche. Dies bestätigt die von Dustman et al (1977) gemachten Beobachtungen.

Im vorliegenden Fall wurde ausschließlich mit einer Reizfrequenz, nämlich 8 Hz, gearbeitet. Im Vorfeld der Hauptuntersuchungen beschränkte sich das Interesse auf in der Folge diskutierten drei Punkte.

4.1.1 Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit einmal gewonnener

Versuchsergebnisse

Experimente zur intraindividuellen Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse wurden von verschiedenen Untersuchern angestellt. Hierzu sei der bereits mehrfach zitierte Artikel von Tyler, Apkarian und Nakayama (1978) angesprochen. Alle Autoren sind sich darin einig, daß bei VEP-Ableitungen große interindividuelle Unterschiede zu Tag treten, während zu verschiedenen Zeitpunkten intraindividuell gewonnene Meßdaten nur geringfügige Abweichungen aufweisen. Diese Auffassung kann unter Berücksichtigung der hier zur Verfügung stehenden Daten nur bedingt vertreten werden.

Die Abb. 4 stellt Amplitudenzüge der Vp BW dar, zwischen deren Ableitung ein - beziehungsweise acht Monate verstrichen. Auffälligerweise sind die ersten kleineren Maxima der Kurven von deutlichen Veränderungen betroffen. Bei zwei der drei Messungen treten durch extrem divergierende Potentialverläufe eng benachbarte Ortsfrequenzen hervor, was den ersten Kurvengipfeln ein unregelmäßiges, zerklüftetes Aussehen verleiht. Diese Ergebnisse beleuchten die Schwierigkeiten, die hinsichtlich der Beurteilung der intraindividuellen Wiederholbarkeit von Meßdaten bei VEP bestehen. So ist z. B. nicht hinreichend bekannt, welchen Einfluß veränderliche physiologische Parameter auf die VEP haben. Unter anderem unterliegen der Hautwiderstand, die Bewußtseinslage und die Leistungsbereitschaft zirkadianen Schwankungen (Rogge, 1981). Die Tageszeit zu der die Messungen vorgenommen werden, kann also durchaus eine Rolle spielen. Zahlreiche physiologische Größen variieren darüber hinaus in noch längeren, beispielsweise jahreszeitlichen Perioden. Die Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit zeigen eine beachtliche Beeinflussbarkeit durch subjektives Empfinden und Stimmungslage. Schon auf der Ebene der lateralen Kniekörper unterliegt die von der Retina kommende Information zahlreichen Einflüssen. Es lassen sich dort Projektionen vom retikulären aufsteigenden System, von den Augenmuskelkernen, vom Kortex und vom kontralateralen Auge nachweisen (Senelick, 1977). Eingänge aus diesen Systemen sind schwer abzuschätzen. Um ein typisches "Kurvenprofil" einer Versuchsperson zu erhalten, ist es deshalb angezeigt, mehrere Messungen durchzuführen.

4.1.2 Verhalten der VEP bei rasch aufeinanderfolgenden Versuchssitzungen

Die Untersuchungen bestanden in jeweils vier Sitzungen mit ein und derselben Vp. Zwischen den einzelnen Experimenten hatte der Proband nur eine kurze Zeitspanne, etwa drei Minuten (so lange brauch-

te der Versuchsleiter zum Starten des Programmes) zur Verfügung, während deren er sich erholen konnte. Vor Durchführung der letzten Sitzung erhielt der Versuchsteilnehmer dreißig Minuten Pause. Exemplarisch seien hierzu Meßdaten der Vp RV vorgestellt. Wie die Abb. 5 veranschaulicht, sinkt die VEP-Amplitude unter diesen Bedingungen ständig ab, wobei das zweite höhere Maximum im allgemeinen stärker betroffen ist. Im dritten Experiment sind die Maxima schließlich etwa gleich hoch. Das kleinere Maximum erfährt im Laufe der drei unmittelbar aufeinanderfolgenden Messungen wenigereine Reduktion der Amplitude als eine Zunahme der Schwankungsbreite der einzelnen Werte. Im Bereich der Kurvenminima ist keine auffällige Veränderung sichtbar. Im Anschluß an den dritten Versuch und einer Regenerationszeit von dreißig Minuten steigen die Amplitudenwerte wieder deutlich an und erreichen ungefähr die selbe Höhe wie in der Kurve, die im zweiten Durchgang gemessen wurde.

Es ist also zwischen den einzelnen Versuchen einer Reihe auf eine ausreichende Erholungszeit der Vpn zu achten, die am besten im Bereich von dreißig Minuten oder etwas darüber liegen sollte.

4.1.3 Beeinflußung der VEP-Antwort durch die Größe des Sehwinkels

Abb. 6 zeigt zwei VEP-Antworten der Vp AS. Der Sehwinkel unter dem der Proband das Testfeld sieht, beträgt einmal, wie gewöhnlich bei allen hier besprochenen Versuchen 5° , das entspricht einem Beobachterabstand von 128 cm, ein anderes Mal 10° , was bedeutet, daß die Entfernung zwischen Vp und Bildschirm 64 cm beträgt. Deutlich läßt sich eine Vergrößerung der VEP-Amplitude nach Verdoppelung des Sehwinkels feststellen.

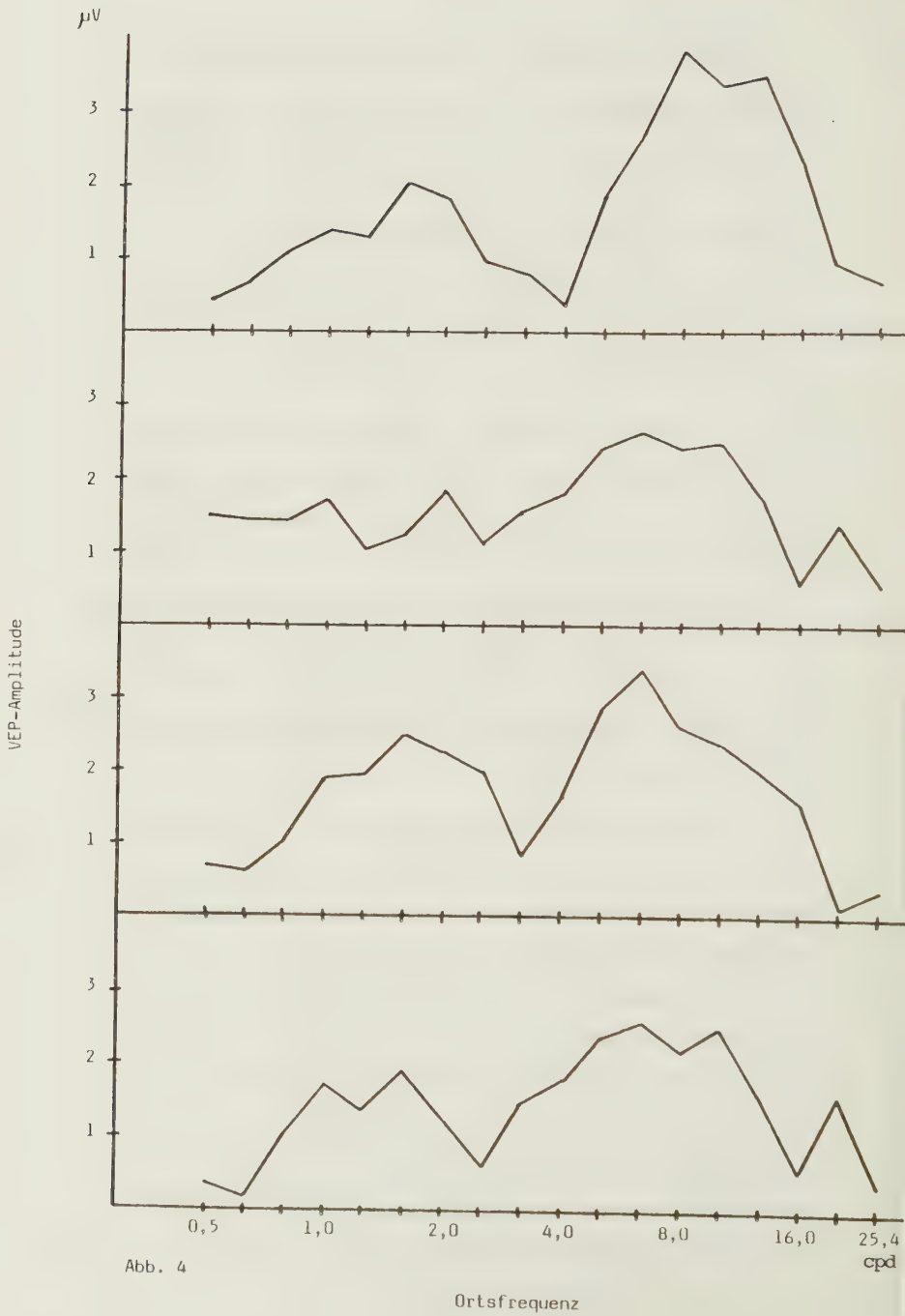
Es ist auffällig, daß die Amplitudenerhöhung, vor allem das erste Maximum der Kurve betrifft. Zudem weist die Amplitude schon bei 0,5 cpd einen Wert von $2 \mu\text{V}$ auf. Der entsprechende Kurvenwert bei 5° Sehwinkel liegt bei $0,9 \mu\text{V}$ und damit auf Rauschniveau. Auch bei

den Kurvenminima machen sich ähnliche Unterschiede bemerkbar. Während sich das Minimum der kleineren Kurve vom Rauschen nicht abhebt, liegt das der größeren doch deutlich darüber. Überhaupt scheint die Amplitudenkurve, deren Messung unter einem größeren Sehwinkel erfolgte, gegenüber der anderen nach links, d. h., in Richtung der niedrigeren Ortsfrequenzen, verschoben.

Zusammenfassend gesagt, wirkt sich eine Vergrößerung des Sehwinkels also vor allem im Bereich der niedrigen Ortsfrequenzen auf die VEP-Amplitudenantwort aus.

Abb. 4: Die Abbildung zeigt eine Meßserie zur intraindividuellen Reproduzierbarkeit der VEP. Die Amplitudenkurven wurden bei der Vp BW innerhalb von acht Monaten gemessen. Näheres siehe im Text.

Abb. 5: Die ersten drei VEP der Vp RV wurden rasch hintereinander abgeleitet. Deutlich zeigt sich die Abnahme der Amplitudenhöhe. Die vierte Kurve zeigt den Amplitudenverlauf nach 30 Minuten Erholungszeit. Einzelheiten finden sich im Text.



μV

1. Versuch

3

2

1

2. Versuch

3

2

1

3. Versuch

3

2

1

4. Versuch

3

2

1

0,5

1,0

2,0

4,0

8,0

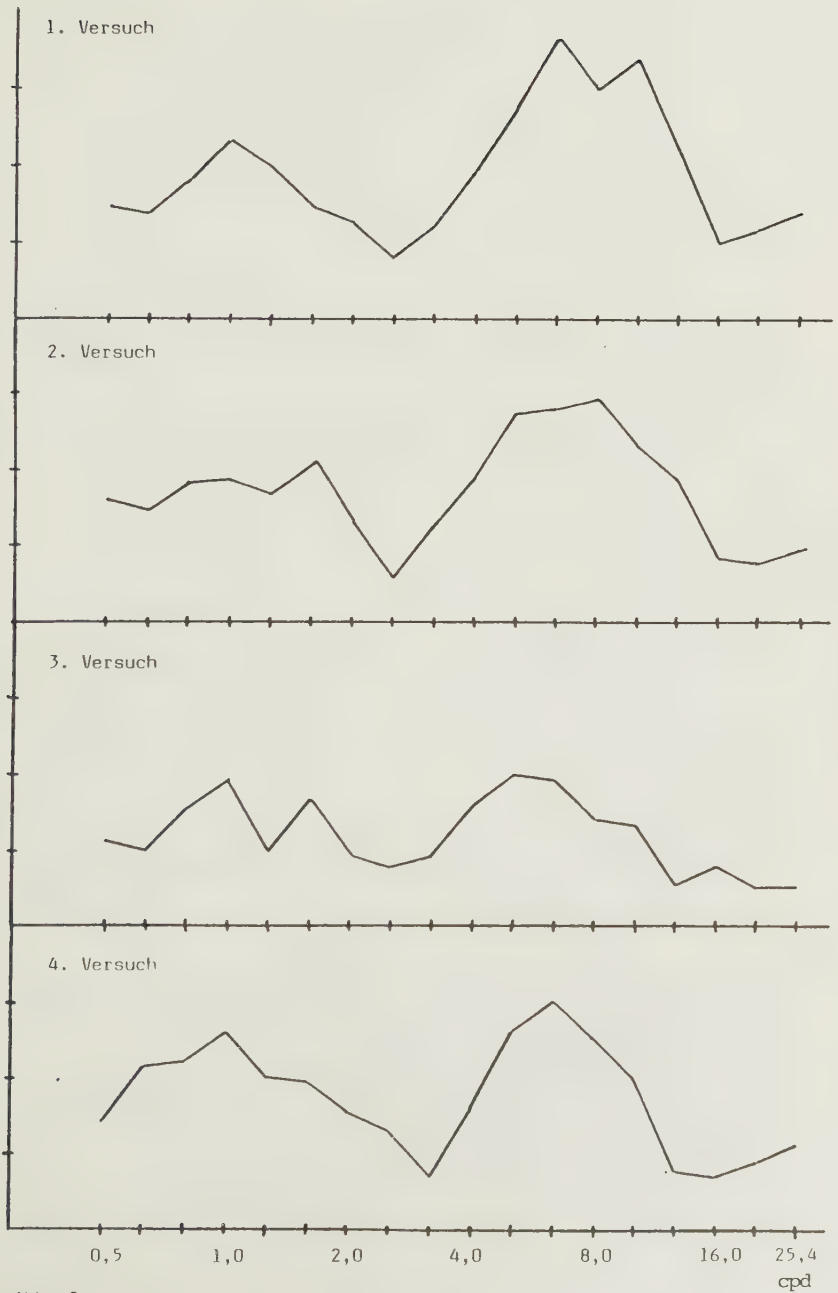
16,0

25,4

cpd

Abb. 5

Ortsfrequenz



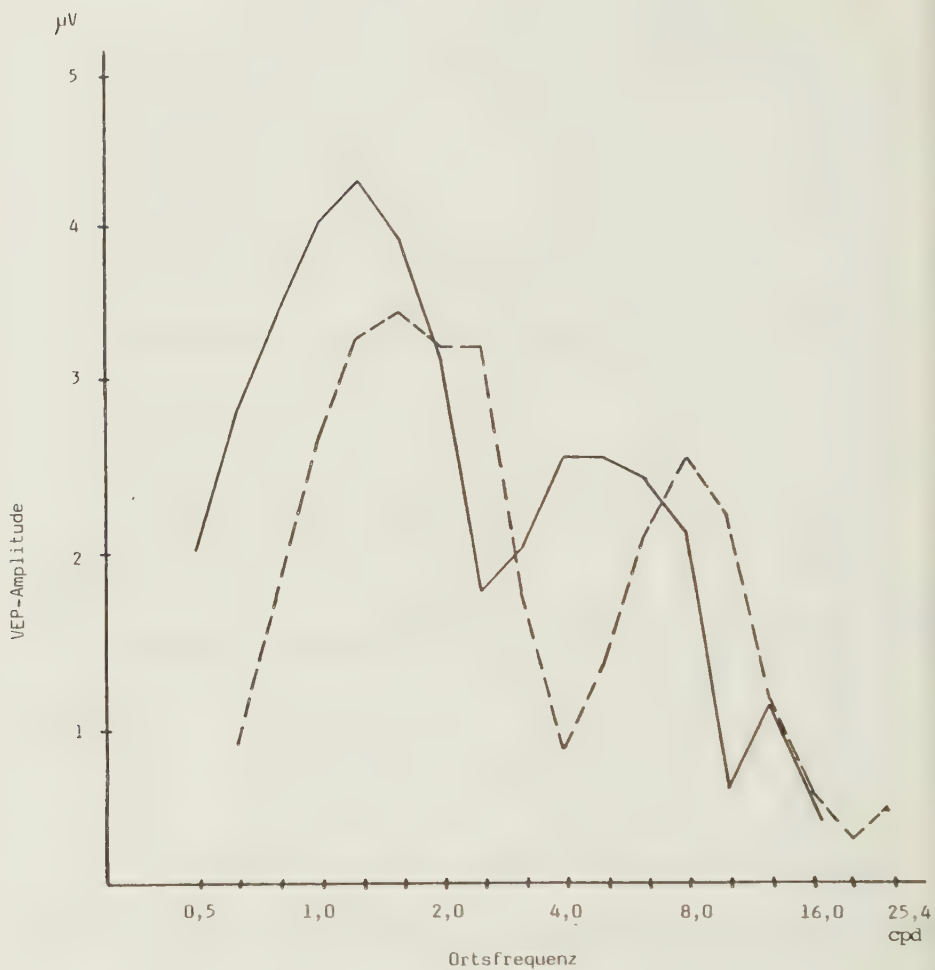


Abb. 6: Die strichlierte Kurve wurde unter einem Sehwinkel von 5° , die durchgezogene unter 10° gemessen.

5° Sehwinkel entsprechen einem Beobachterabstand von 128 cm, 10° einem Abstand von 64 cm. Siehe dazu auch Text.

VP	Alter in Jahren	Korrektur in D p t	Visus Landolt
AF	24	-	1,3
AL	26	- 1,2 li - 1,9 re	1,0
AM	24	-	1,2
AS	27	-	1,3
BW	30	-	1,2
CF	23	-	1,2
CP	26	-	1,2
CS	26	- 2,1 li - 3,2 re	1,0
CSE	24	-	1,1
EH	22	-	1,3
EM	27	-	1,1
GM	28	-	1,0
JL	22	-	1,3
MB	27	-	1,3
MK	24	-	1,4
RV	28	-	1,2
UZ	27	-	1,4
WS	31	-	1,2

Tabelle: In der vorliegenden Arbeit fanden die VEP von 17 weiblichen und einer männlichen Vp (WS) Aufnahme. Alter und Visus der Vpn sind der Tabelle zu entnehmen. Die beiden Vp AL und CS, die an einer Myopie litten, trugen während des Experimentes Kontaktlinsen. Die Versuchsergebnisse zu den obenstehenden Vp sind in Abb. 7 bis Abb. 29 (Seite 51 bis Seite 71) dargestellt

4.2 Darstellung des Amplitudenverhaltens emmetroper Versuchspersonen

Die Mehrzahl der Probanden, nämlich dreizehn, darf einer Gruppe zugerechnet werden, deren VEP-Amplituden einen mehr oder minder zweigipfligen Verlauf aufweisen. Es handelt sich hierbei um CS, Abb. 14; CP, Abb. 13; AM, Abb. 8; MK, Abb. 21; WS, Abb. 23; AL, Abb. 9; GM, Abb. 18; AF, Abb. 7; CSE, Abb. 15; BW, Abb. 11; RV, Abb. 12; AS, Abb. 10; und EH, Abb. 16. Hinweise auf ein Amplitudenverhalten dieser Art finden sich unter anderem in Publikationen von Tyler, Apkarian und Nakayama (1978) sowie in der Dissertation von Lorbeer (1982). Demgegenüber veröffentlichen andere Autoren, wie beispielsweise Campbell und Maffei (1970) und Rentschler und Spinelli (1978), Versuchsergebnisse, die auf einen eher eingipfligen, der psychophysischen Kontrastempfindlichkeitsfunktion ähnlichen Kurvenverlauf, hindeuten.

Zunächst soll nun diese Hauptgruppe besprochen werden.

Sieben der angesprochenen Vpn zeigen im zweiten Maximum des Kurvengangs deutlich höhere Amplitudenwerte als im ersten (siehe hierzu AS, Abb. 10; AF, Abb. 7; EH, Abb. 16; CSE, Abb. 15; RV, Abb. 22; AM, Abb. 8; BW, Abb. 11). Weitere fünf Probanden dieser Zuordnung, nämlich AL, Abb. 9; WS, Abb. 23; MK, Abb. 21; CP, Abb. 13 und CS, Abb. 14, haben gleich hohe Amplitudenausschläge in beiden Maxima, und nur bei einer Vpn (GM, Abb. 18) ist der erste Gipfel höher als der zweite. Das Minimum zwischen beiden Hügeln ist recht verschieden ausgeprägt. In der Regel liegt es in einem Intervall, das etwa von 2 und 4 cpd begrenzt ist. Eine Ausnahme hiervon stellen AF, Abb. 7; AL, Abb. 9; und GM, Abb. 18, dar. In den ersten beiden Fällen erscheint das Kurvental bei etwa 6 cpd, während es sich bei GM, Abb. 18, in der Umgebung von ca. 5 cpd befindet. Die Minima sind in ihrer Ausprägung sehr variabel. In den Amplitudendarstellungen von EH, Abb. 16 und AS, Abb. 10, treten sie kaum als solche hervor und weisen noch Potentiale von beinahe 3 μ V auf, was im Ver-

gleich zu anderen Vpn - stellvertretend seien AM; Abb. 8 und WS, Abb. 23, genannt - eine recht beträchtliche Höhe ist. Es soll hier noch angemerkt werden, daß der Kurvenzug von EH, Abb. 16 nicht einfach zu interpretieren ist, denn man könnte ebenso gut in der Senke bei 0,8 cpd ein Minimum vermuten und die initiale Amplitudenelongation bei 0,5 cpd als erstes Maximum deuten. In den Diagrammen aller anderen Vpn fallen die Amplitudenwerte an der Stelle des Minimums auf Rauschniveau ab.

Bei zehn Vpn, des hier in Rede stehenden Typus, tritt das erste Maximum im Bereich von ca. 2 cpd auf. Sonderfälle bilden AF, Abb. 7, und AL, Abb. 9, in deren Fall die ersten Gipfel bei etwa 2,5 cpd erscheinen, und CS, Abb. 14 mit einem ersten Maximum bei ca. 0,8 cpd. Wie bereits erwähnt, wäre es auch denkbar, EH, Abb. 16 unter diese Ausnahmen einzureihen.

Wie aus den Darstellungen der Meßergebnisse ersichtlich, unterliegen nicht nur die Minimal- und Maximalwerte der VEP enormen Schwankungen, sondern auch die Basis der einzelnen Hügel ist sehr unterschiedlich ausgedehnt. Um dieses zu illustrieren, seien die Vpn AF, Abb. 7 und RV, Abb. 22 herausgegriffen. Bei AF, Abb. 7 erstreckt sich der Hügel von 0,5 cpd bis etwa 5 cpd, wenn man ihm alle Amplitudenwerte zurechnet, die über dem Rauschpegel liegen. Im Vergleich dazu nimmt der erste Gipfel bei RV, Abb. 22 nur eine Strecke von ca. 2 cpd (er verläuft von 0,5 bis 2,5 cpd) ein. Umgekehrte Verhältnisse herrschen bei den jeweils zweiten Maxima der beiden Probanden. Bei AF, Abb. 7 umspannt die Basis des zweiten Hügels ein Frequenzspektrum von 5 cpd bis 16 cpd, bei RV, Abb. 22 von ca. 2,5 cpd bis 16 cpd.

Insgesamt sei noch einmal betont, daß die Amplitudenwerte recht große Unterschiede zeigen (vergleiche hierzu AM, Abb. 8 und AL, Abb. 9 einerseits sowie AF, Abb. 7 und AS, Abb. 10 andererseits). Bemerkenswert erscheint auch, daß, würde man in den vorliegenden

VEP ein Maß der Empfindlichkeit für bestimmte Ortsfrequenzen sehen, das Sensibilitätsspektrum bei verschiedenen Vpn einmal mehr bei tiefen, einmal mehr bei hohen Ortsfrequenzen zu liegen käme (siehe dazu beispielsweise IL, Abb. 19 und GM, Abb. 18 im Vergleich mit AF, Abb. 7 und AS, Abb. 10). Dies steht im krassen Gegensatz zu den Befunden, die durch die psychophysisch ermittelte Kontrastempfindlichkeitsfunktion erhoben wurden, für die sich eine maximale Sensibilität im Bereich mittlerer Ortsfrequenzen ergab.

Die restlichen fünf Probanden (MB, Abb. 20; EM, Abb. 17; JL, Abb. 19; CF, Abb. 12 und UZ, Abb. 24) sind in ihrer Gruppenzugehörigkeit schwer zu beurteilen. MB, Abb. 20 und EM, Abb. 17 weisen eine prima vista eingipfligen Kurvenzug auf. Besonders das Amplitudenverhalten von EM, Abb. 17, ähnelt aber dem der Vpn der vorher besprochenen Kategorie. Der Kurvenverlauf bis zu 4 cpd liegt nur unwesentlich über dem Rauschniveau und macht den Eindruck als wäre der bei anderen Vpn in diesem Gebiet auftretende Gipfel eingeebnet. Bei 4 cpd scheint sich ebenso ein Minimum zu befinden, wie bei den bisher vorgestellten Vpn. Für MB, Abb. 20, gelten mit Einschränkungen, vor allem hinsichtlich eines Kurvenminimums, die selben Bemerkungen wie für EM, Abb. 17. Mit gutem Willen kann man beide Vpn der Klasse zweigipflig verlaufender VEP-Amplituden zuordnen. Unerklärlich ist das Fehlen einer VEP-Antwort bei CF, Abb. 12 und UZ, Abb. 24. Beide Vpn wurden mehrmals vermessen, und die Ergebnisse waren reproduzierbar. UZ, Abb. 24, hatte einen Visus von 1,4. Der Visus von CF, Abb. 12, betrug 1,2. Beide Vpn müssen als völlig normalsichtig bezeichnet werden, und die psychophysisch bestimmte Kontrastempfindlichkeitsfunktion zeigt keinerlei Abweichungen, die eine Beeinträchtigung des visuellen Systems gerechtfertigt vermuten ließen. Wie später noch zu besprechen sein wird, zeigt auch der Phasenverlauf dieser beiden Vpn ein völlig regello-

ses Bild.

Das Amplitudenverhalten von JL, Abb. 19, ist ebenfalls einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen. Es weist, wenn überhaupt, Gemeinsamkeiten nur mit GM, Abb. 18, auf. Beide Versuchsteilnehmer haben die höchsten Amplitudenausschläge im Bereich niedriger Ortsfrequenzen. Im Falle von JL, Abb. 19, liegt der höchste Potentialwert in der Nähe von 1,0 cpd. Es bleibt zu vermuten, ob sich bei ca. 2 cpd ein angedeutetes Kurvental befindet, das in etwa vergleichbar ist mit den wenig akzentuierten Senkungen bei AS, Abb. 10 und EH, Abb. 16.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Amplitudenwerte der beiden kurzsichtigen Vpn AL, Abb. 9 und CS, Abb. 14, sehr niedrig ausfielen. Die entsprechenden Abbildungen zeigen jedoch eine gängige Kurvenform. Rentschler und Spinelli (1978) fanden in ihrer Arbeit, daß ein verändertes Refraktionsverhalten des optischen Apparates, also auch Myopie, durchaus die VEP beeinflusst. Es ist jedoch unklar, warum es im vorliegenden Fall zu einer so drastischen Verkleinerung der Amplituden kam, da beide Vpn durch eine Kontaktlinsenkorrektur, wie bereits angedeutet, einen Visus von 1,0 hatten. Die psychophysisch gemessene Kontrastempfindlichkeit ist sowohl bei CS, Abb. 14, als auch bei AL, Abb. 9, unauffällig. Das Phasenverhalten scheint bei AL, Abb. 9, etwas diffus, während es sich bei CS, Abb. 14, nicht merklich von anderen Vpn unterscheidet.

4.3 Darstellung des Phasenverhaltens

Bei allen Probanden des zweigipfligen Kurventyps findet sich an der Stelle des Minimums im Amplitudenbild ein variabel ausgeprägter "Phasensprung". Unter "Phasensprung" wird in dieser Arbeit ein abruptes Zunehmen der Anstiegssteilheit der Phasenkurve verstanden. Zur Verdeutlichung sei das Phasenbild von CP, Abb. 13, herausge-

griffen. Hier findet sich in Höhe von etwa 4 cpd im Phasenverlauf ein Sprung von ca. 250° zur nächsten Reizfrequenz (6 cpd), während der Graph in den übrigen Frequenzbereichen einen kontinuierlichen Anstieg, fast im Sinne einer Geraden, zeigt.

Eine Änderung des Phasenverhaltens dieser Art wird auch in dem bereits erwähnten Artikel von Tyler, Apkarian und Nakayama (1978) beschrieben. Sie tritt besonders deutlich bei AM, Abb. 8; CP, Abb. 13; MK, Abb. 21; EH, Abb. 16; AL, Abb. 9 und GM, Abb. 18, hervor. Von einigem Interesse sind auch die Phasendiagramme von UZ, Abb. 24 und CF, Abb. 12, der Vpn, bei denen sich keine VEP ableiten ließen. Das Phasenbild scheint hier völlig diffus, und im Gegensatz zu anderen Vpn läßt sich kein irgendwie gerichteter Verlauf feststellen. Dies ist ohne weiteres verständlich, da es ja keine spezifische Reizantwort des visuellen Kortex gibt und die Phasen wie die Amplitudenwerte einer Zufallsverteilung folgen. Der Phasengang bei CS, Abb. 14, jedoch, einer der myopen Vpn, deren VEP-Amplituden nur geringgradig über dem Rauschen liegen, entspricht durchaus dem der anderen Versuchsteilnehmer. Auch fehlt bei dieser Vp, in Übereinstimmung mit den anderen Probanden, keineswegs der "Phasensprung" bei ca. 2 cpd. Auch bei EM, Abb. 17, pendeln die Phasenwerte anfänglich hin und her, um nach Erreichen der Stelle, an der sich ein mutmaßliches Amplitudenminimum befindet, in eine gerichtete Phasenänderung überzugehen. Aus diesem Sachverhalt könnte sich die Möglichkeit ergeben, sehr schwach ausgeprägte VEP-Amplituden von Rauschphänomenen abzugrenzen, da man davon ausgehen darf, daß eine gerichtete Phasenbewegung nur bei, wenn gleich auch gegebenenfalls geringen, Amplituden vorkommt.

Der "Phasensprung" koinzidiert nur mit den Amplitudenminima. Er fällt nicht mit anderweitigen größeren Amplitudenschwankungen zusammen. Solche, in der Amplitudenkurve vorkommende Zacken, stellen daher wahrscheinlich keine eigenständige Maxima des VEP dar. Es

wurde im methodologischen Teil dieser Arbeit darauf aufmerksam gemacht, welche Einschränkungen bei der Interpretation der Phasenbilder angebracht sind. Unter Berücksichtigung dieser Vorbehalte und Auslassung der Phasendiagramme von UZ, Abb. 24 und CF, Abb. 12, aus bereits angesprochenen Gründen, darf behauptet werden, daß sich hinsichtlich des Phasenverhaltens zwei Typen herauskristallisieren. Die Vpn WS, Abb. 23; CSE, Abb. 15; RV, Abb. 22; EH, Abb. 16 und BW, Abb. 11, zeigen einen flachen, wenig ansteigenden Phasengang, in dem der "Phasensprung" eher als Mulde in der Höhe des Amplitudenminimums imponiert. Steile Abbrüche im Phasenbild, die bei sehr hohen Ortsfrequenzen gesehen werden, gehen mit einem Rückgang der Amplitude auf Rauschniveau einher. Bei einigen Vpn äußert sich dieses Absinken der Potentiale am Ende des Frequenzspektrums auch in einem Hinundherschwanken des Phasenverlaufs.

Die zweite größere Gruppe setzt sich aus AL, Abb. 9; MB, Abb. 20; JL, Abb. 19; EM, Abb. 17; CS, Abb. 14; GM, Abb. 18; CP, Abb. 13; AF, Abb. 7; MK, Abb. 21 und AS, Abb. 10, zusammen. In diesen Fällen kann man den "Phasensprung" als stetig ansteigend bezeichnen. Der "Phasensprung" erscheint als sichtbare Versteilerung der Kurve. Ein so geartetes Phasenverhalten drängt die Annahme auf, die zeitliche Latenz bis zum Auftreten der VEP-Antwort nehme zu höheren Ortsfrequenzen hin zu.

Einer solchen Hypothese jedoch scheinen die Beobachtungen, die an den Probanden, die den Phasenverlauf des ersten Typs repräsentieren, zu widersprechen. Ein Charakteristikum der zweiten Gruppe scheint auch zu sein, daß der initiale Phasenanstieg recht schleppend vor sich geht. Augenfällige Beispiele für diese Behauptungen sind die Versuchsergebnisse von AF, Abb. 7; EM, Abb. 20 und MK, Abb. 21. Sehr deutlich zeigt sich bei MK, Abb. 21, das anfänglich fast horizontale Fortschreiten der Phase, das sich nach der Stei-

gungszunahme in Höhe des Amplitudenminimums in ein steileres An-
wachsen der Phase fortsetzt. Dieses Steilerwerden der Kurve in der
Gegend des zweiten Amplitudenhügels ist auch bei AS, Abb. 10,
deutlich auszumachen. Allerdings ist es auch bei JL, Abb. 19, zu
beobachten, deren Amplitudenbild nur einen Gipfel, der zu den nied-
rigeren Ortsfrequenzen hin verschoben ist, aufweist.

Es soll im Rahmen dieser willkürlichen Einteilung nicht unterschla-
gen werden, daß man bei einigen Vpn der ersten Gruppe ebenso eine
leichte, wenn auch geringer ausgeprägte, Zunahme der Anstiegssteil-
heit, die mit dem Auftreten des zweiten Amplitudenmaximums zusam-
mentrifft, behaupten könnte. Möglicherweise ist die Differenzierung
der beiden Phasentypen also nicht zulässig. Der Phasenverlauf des
zweiten Typs erinnert in einigen Beispielen (siehe besonders AF,
Abb. 7 und MK, Abb. 21) an eine sigmoide Kurve. Im steilen Bereich
des Graphen liegen dann vor allem jene Ortsfrequenzen, für die psy-
chophysisch gemessen, die höchsten Empfindlichkeiten bestehen. Die
VEP-Antwort auf diese Reizfrequenzen des mittleren Bereiches er-
folgt gegenüber den Ortsfrequenzen des oberen und unteren Spektrums
mit deutlich unterschiedlicher Latenz. Tiefe und hohe Ortsfrequen-
zen werden, unterlegt man den sigmoiden Kurvenmodus, mit annähernd
gleichen Latenzen beantwortet.

Abschließend sei noch erwähnt, daß die Steilheit der Phasenkurve
nicht mit der Höhe der Amplitudenwerte korreliert. So verläuft der
Graph in der Phasendarstellung von EH, Abb. 16, beinahe in hori-
zontaler Richtung, obwohl sehr hohe Amplitudenausschläge gemessen
wurden. Auch bei MK, Abb. 21, zeigt sich beinahe kein Steilerwerden
der Phasenbewegung im Bereich des ersten, sehr hohen, Amplituden-
maximums.

4.4 Darstellung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren zur Ermittlung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion (CSF) wird in 3.4 beschrieben.

Für vierzehn Vpn (AL, EM, UZ, CF, MB, BW, AS, MK, AM, EH, CP, RV, JL, CS - siehe Abb. 7 - Abb. 24) wurden psychophysische Kontrastempfindlichkeitsfunktionen gemessen. Wie bereits erwähnt, wurde für jede Ortsfrequenz der gerade noch wahrnehmbare Kontrast (Schwellenkontrast) bestimmt.

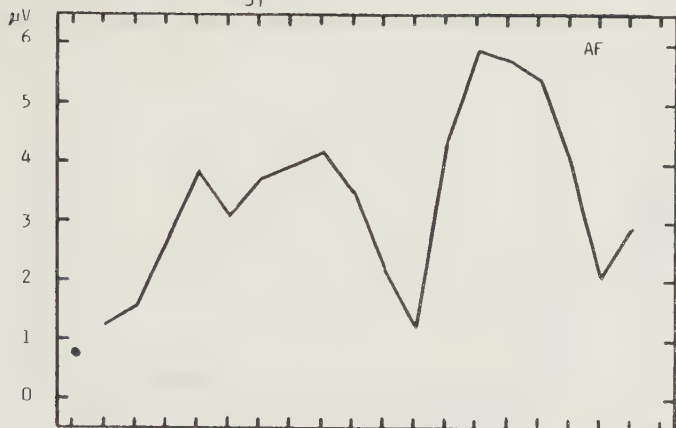
Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen Befunde, wie sie aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannt sind (z. B. Campbell und Maffei, 1970). Auffälligerweise liegt die maximale psychophysisch bestimmte Kontrastempfindlichkeit beinahe aller Vpn in einem Intervall mit den Grenzen 2 cpd und 4 cpd, also gerade in dem Bereich, in dem bei einer großen Anzahl von Probanden die VEP-Amplitude auf Rauschniveau absinkt. Es sei an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben, daß auch UZ, Abb. 24 und CF, Abb. 12, bei denen sich, wie beschrieben, keine VEP messen ließen, völlig normale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen aufweisen. Da die psychophysische Bestimmung der Kontrastempfindlichkeit eine Schwellenmessung darstellt, ist sie nicht ohne weiteres mit den hier vorgestellten VEP, die ja im überschwelligen Bereich gewonnen wurden, vergleichbar. Deshalb wurde mit den Vpn JL, Abb. 19; RV, Abb. 22; BW, Abb. 11; MB, Abb. 20 und AS, Abb. 10, eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Für jede der betreffenden Vpn wurde mit sechs verschiedenen Kontrasten, die jeweils zwischen 40% und 1% lagen, über das Spektrum der zur Verfügung stehenden Ortsfrequenzen gemessen. Dabei stellte sich heraus, daß die beschriebene Doppelgipfligkeit der VEP-Kurven im Bereich der Schwellenkontraste weniger akzentuiert wirkt und statt dessen ein manchmal eingipflig erscheinender Potentialverlauf auftritt, der eher mit den entsprechenden psycho-

physischen Daten verglichen werden kann. Man beobachtet auch, daß die Maxima der Amplitudenkurven mit abfallenden Kontrasten kontinuierlich schmaler werden, d. h., bei sehr tiefen und sehr hohen Frequenzen kann keine Reizantwort mehr gemessen werden. Dieses Amplitudenverhalten wird sehr schön durch die von Strasburger (1986) gefertigten perspektivischen 3D-Bilder demonstriert, die für die oben angesprochenen Vpn in diese Arbeit Aufnahme fanden.

Die Ähnlichkeit von psychophysischer und elektrophysiologischer Kontrastempfindlichkeit im Schwellenbereich und das Abweichen überschwelliger VEP-Messungen von psychophysischer Daten legt die Vermutung nahe, daß die Reiz - Reaktionsbeziehung in Richtung auf hohe und gesättigte Kontraste durch zunehmende Nichtlinearität gekennzeichnet ist.

Abb. 7

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE

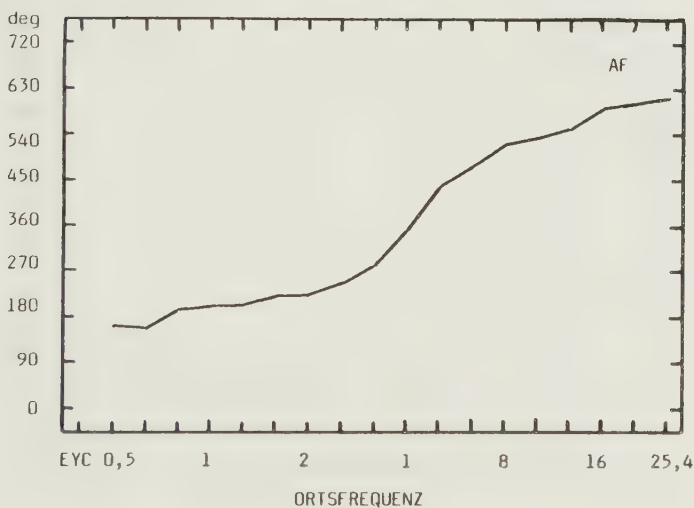


Abb. 7 - Abb. 24

zeigen - aufgetragen gegen das Spektrum der gemessenen Ortsfrequenzen - für jeweils eine Vp Amplitudenwerte, Phasenwerte und Kontrastempfindlichkeitsfunktion. Näheres siehe Text.

Abb. 8

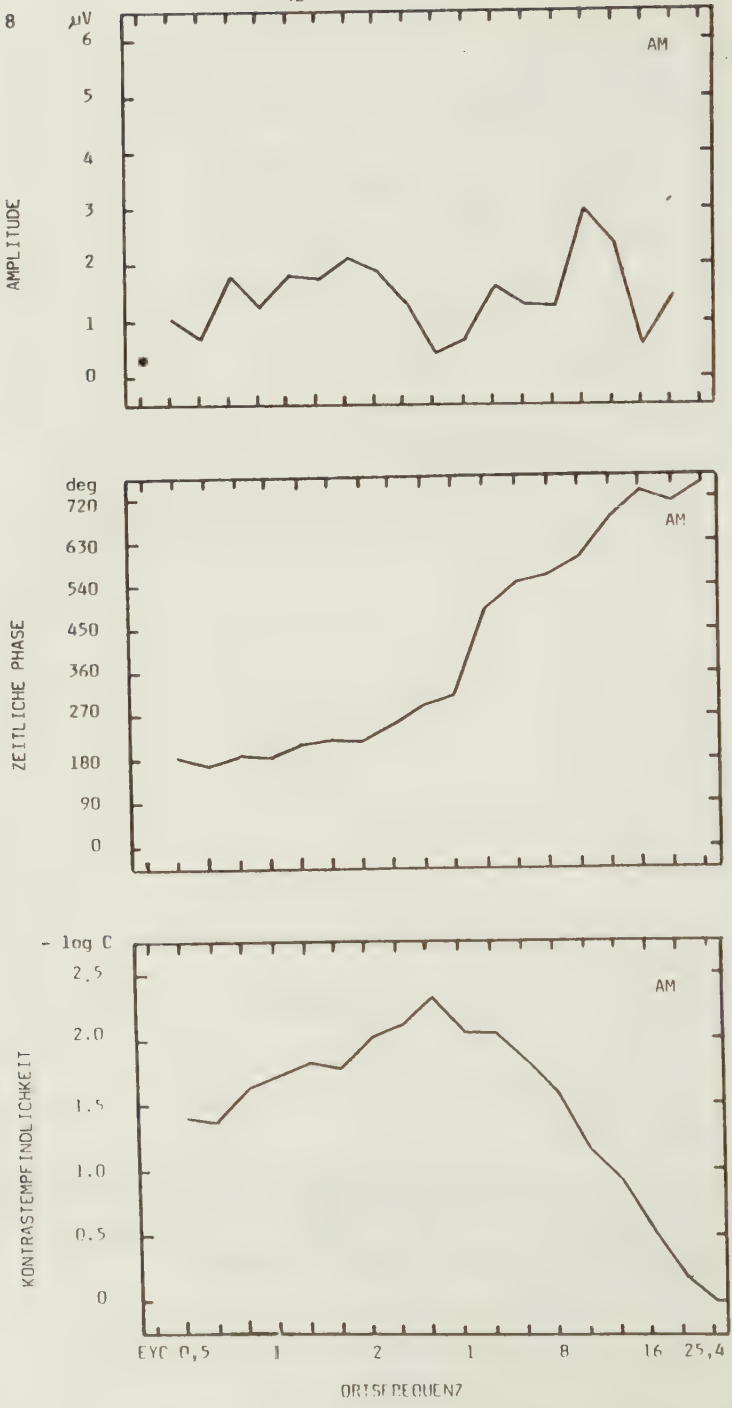


Abb. 9

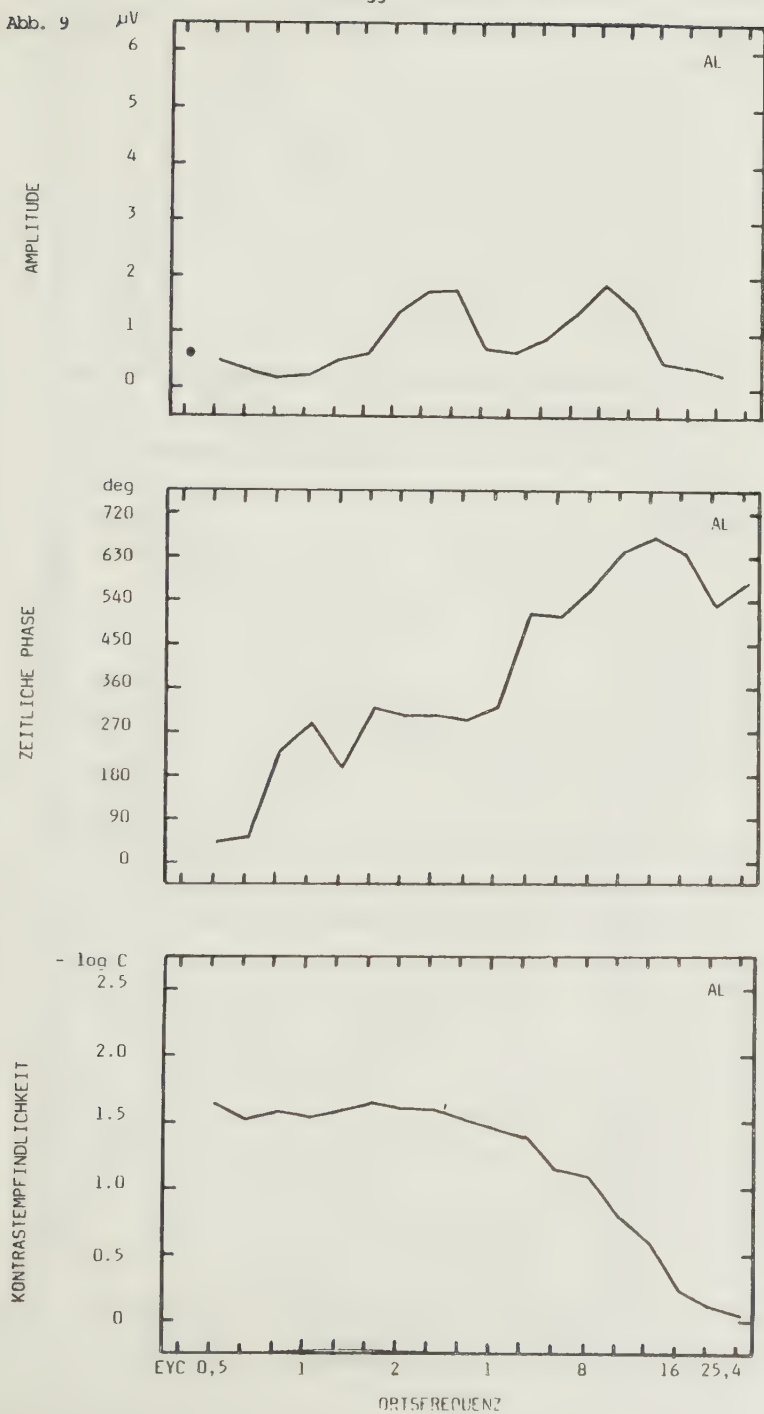


Abb. 10

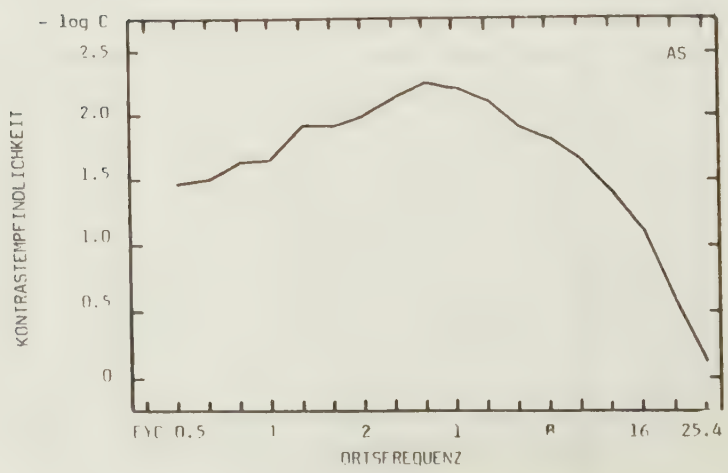
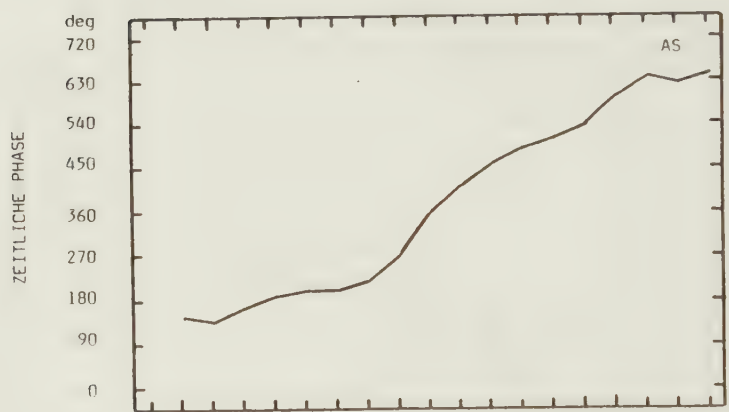
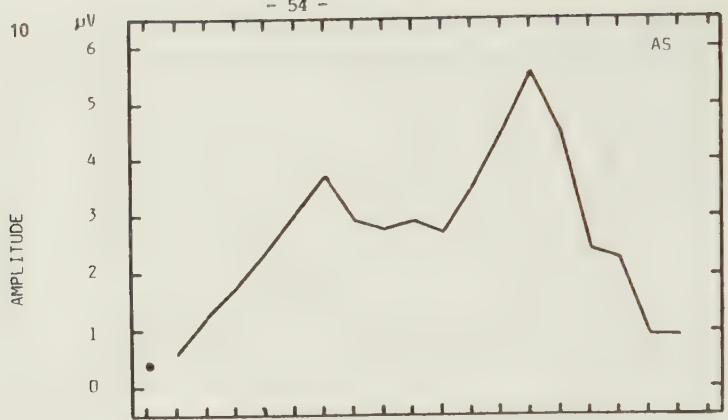


Abb. 11

- 55 -

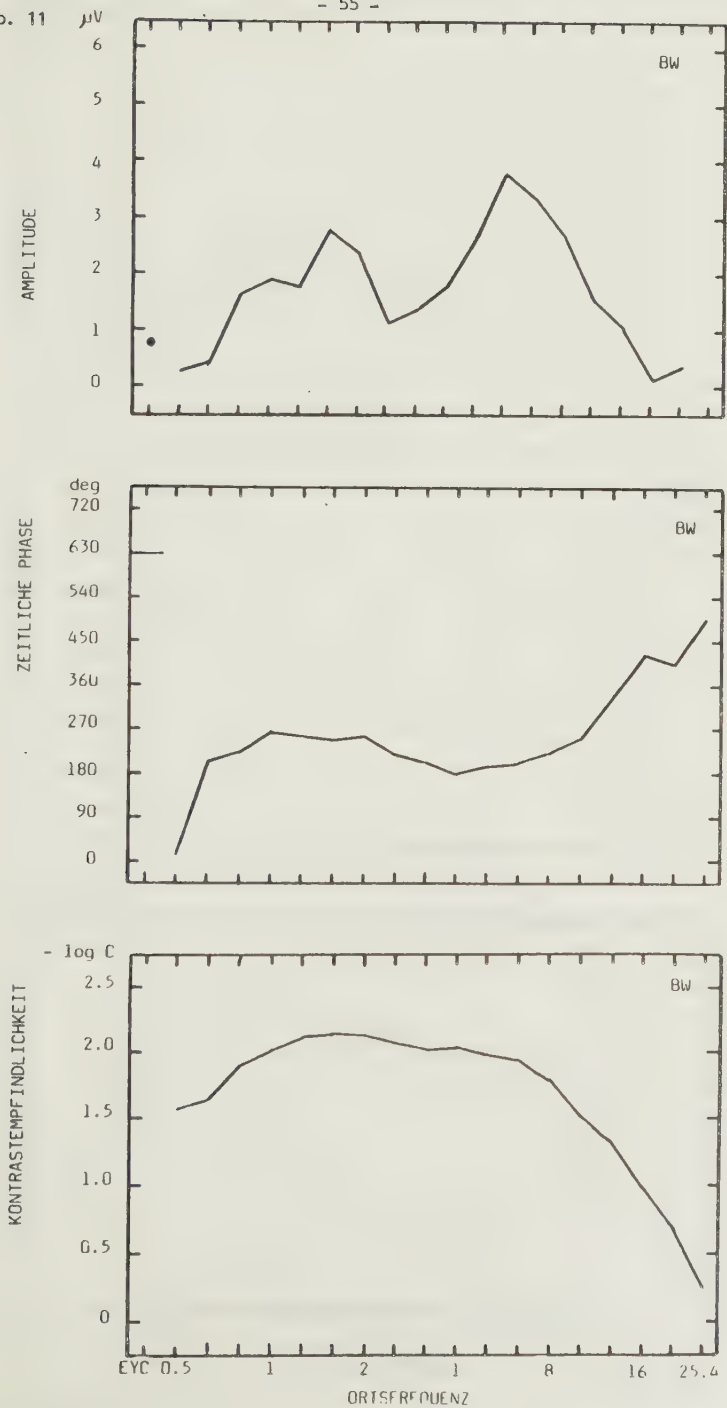
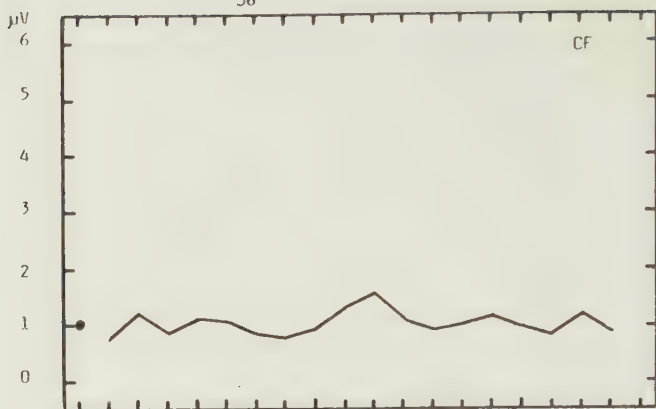


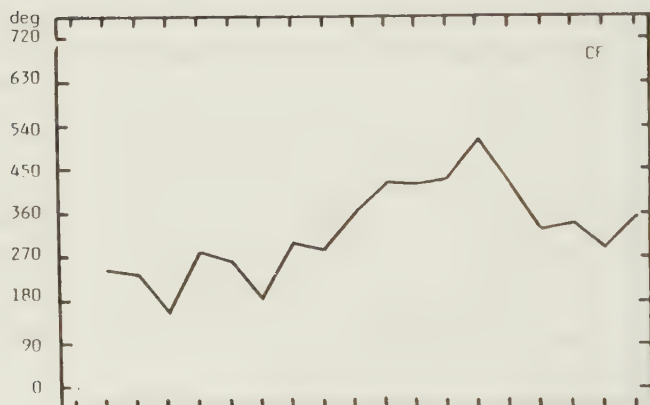
Abb. 12

- 56 -

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE



KONTRASTEMPFINDLICHKEIT

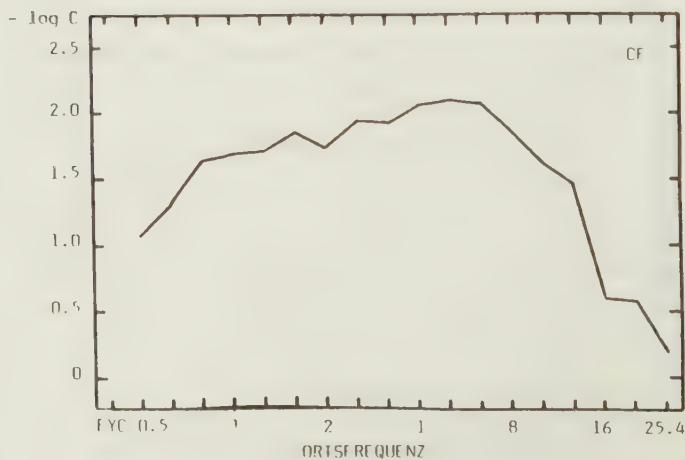


Abb. 13

- 57 -

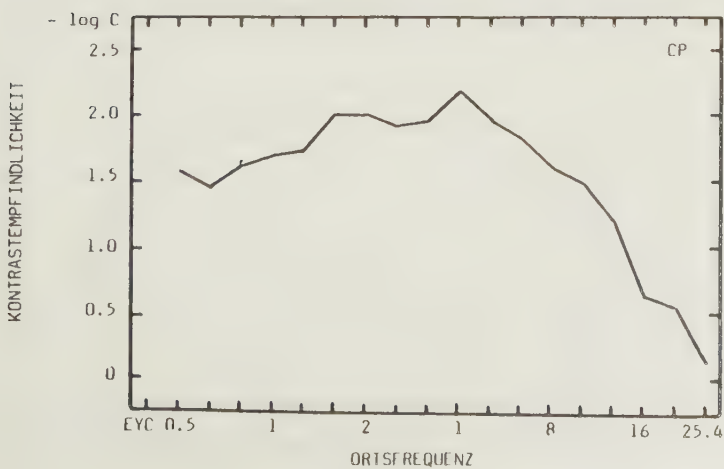
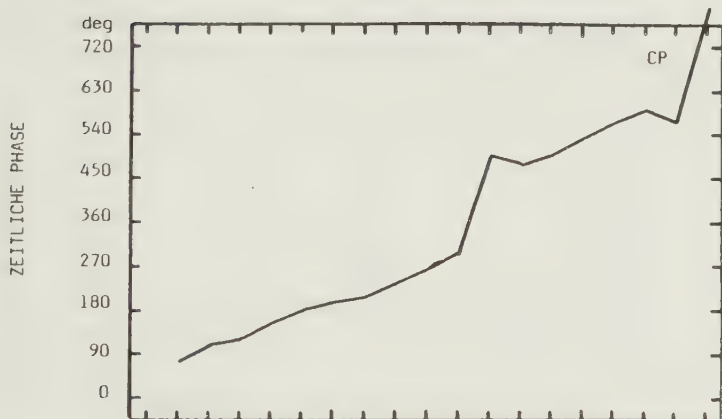
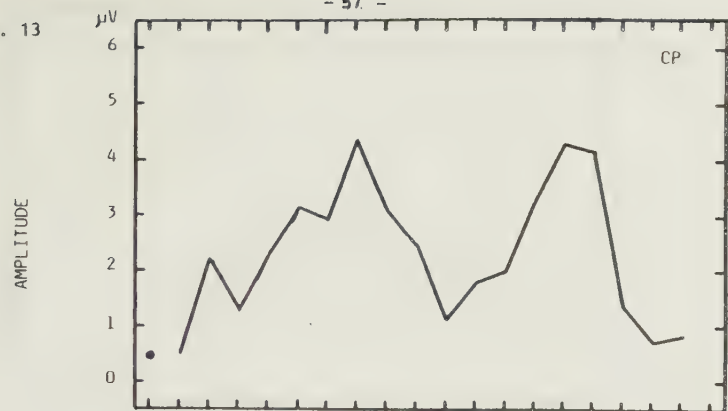


Abb. 14

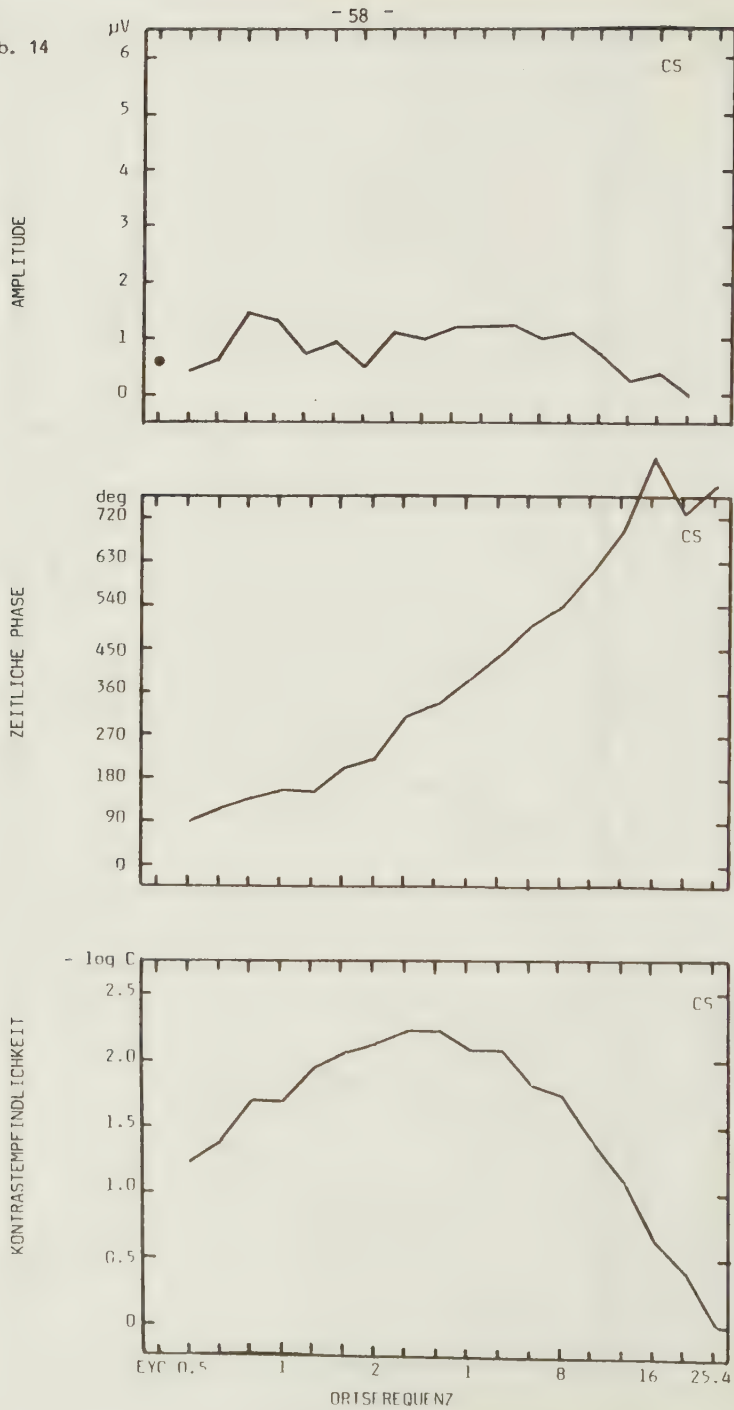


Abb. 15

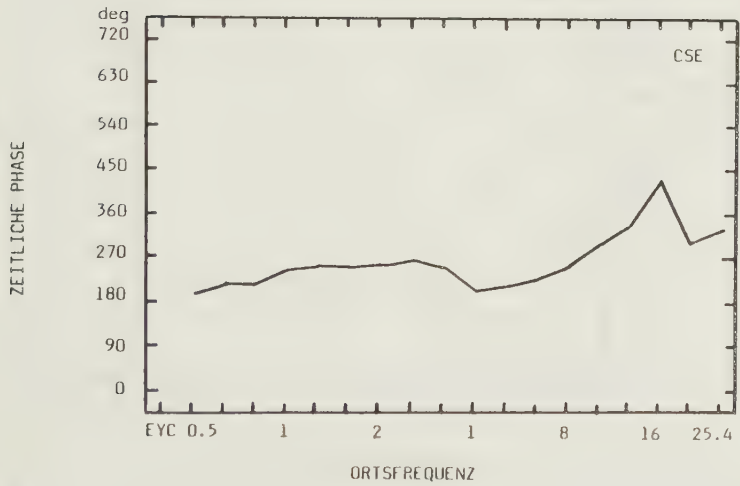
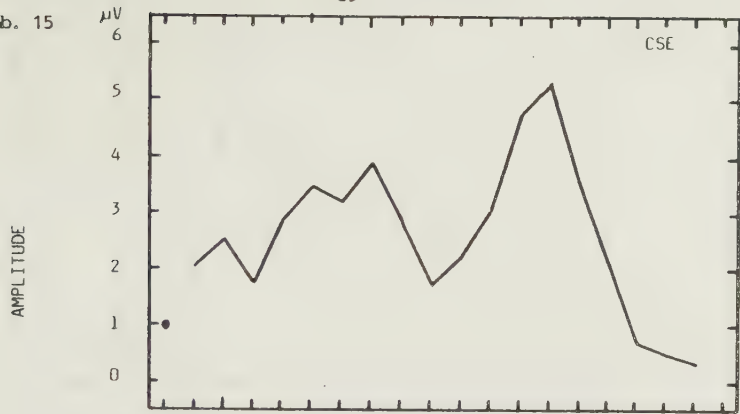
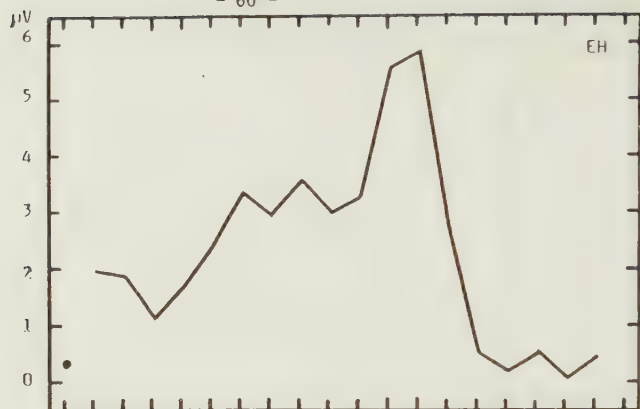
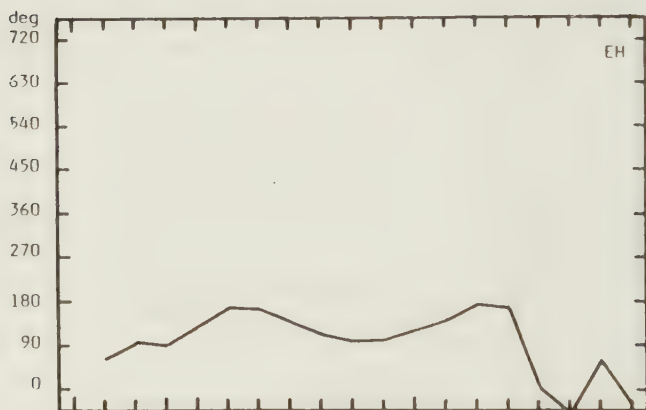


Abb. 16

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE



KONTRASTEMPfindlichkeit

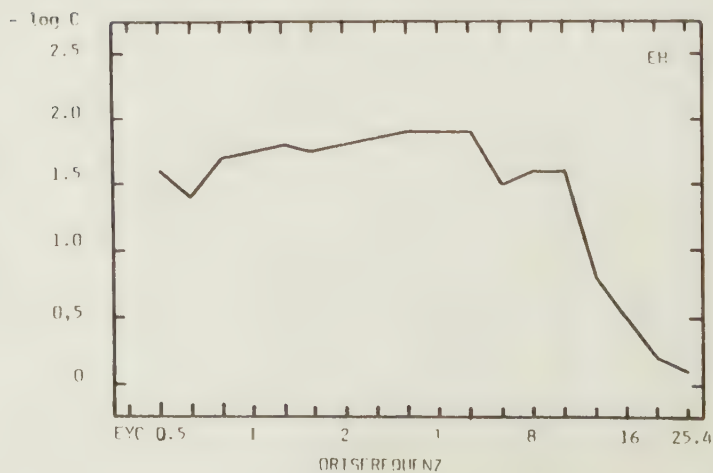
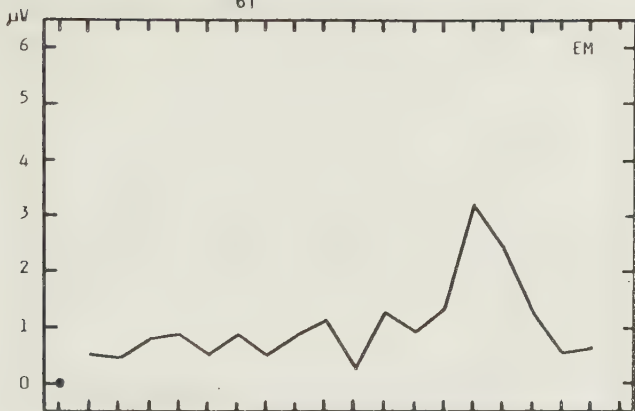
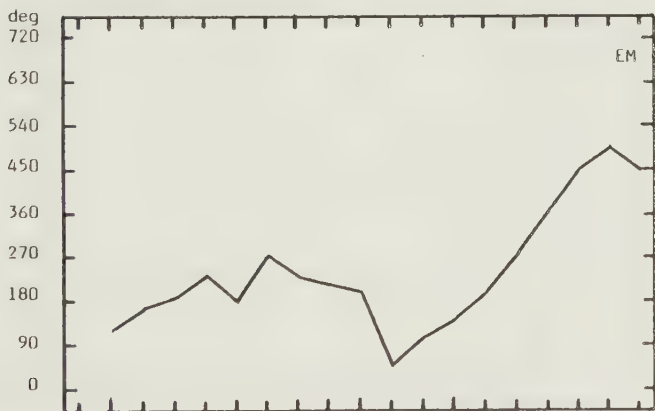


Abb. 17

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE



KONTRASTEMPFINDLICHKEIT

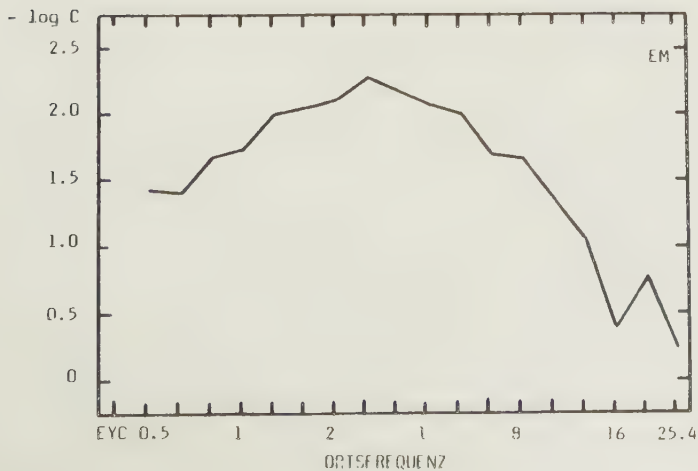


Abb. 18

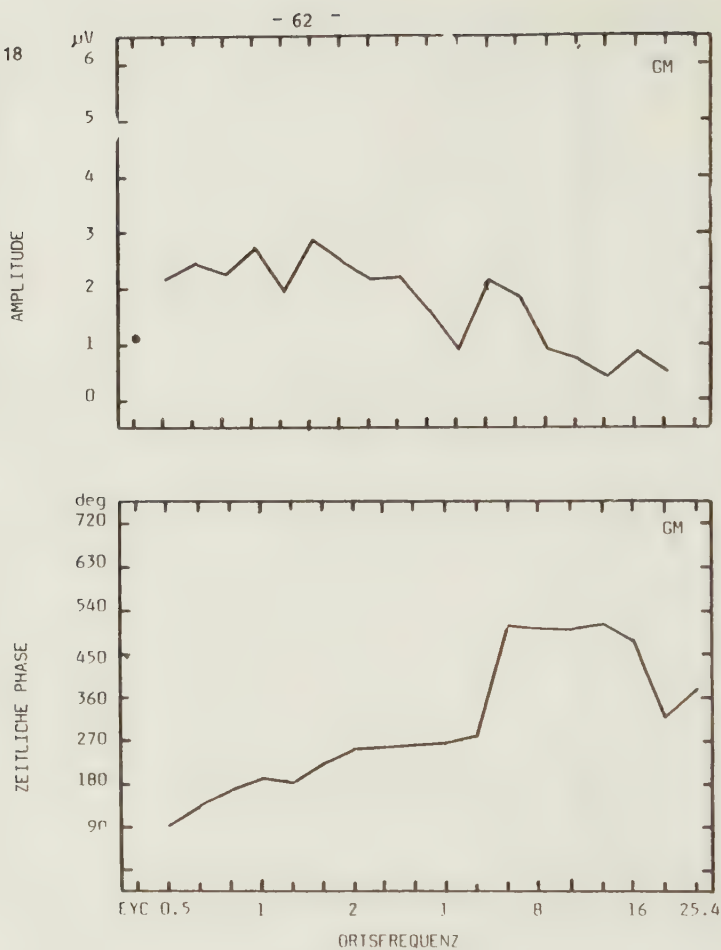
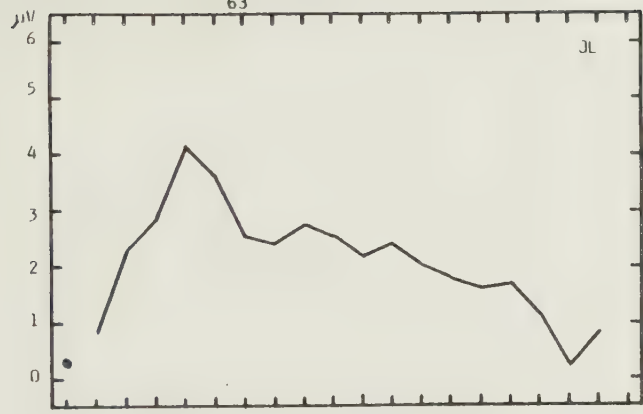


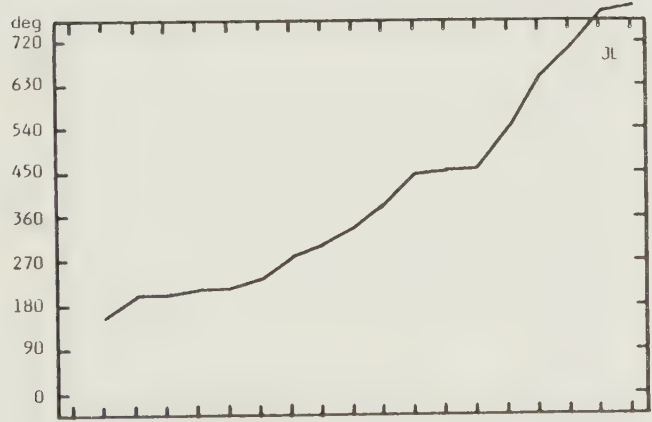
Abb. 19

- 63 -

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE



KONTRASTEMPfindlichkeit

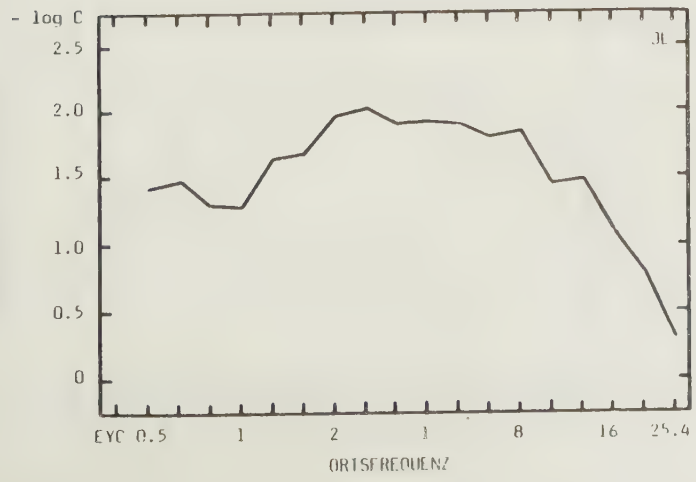


Abb. 20

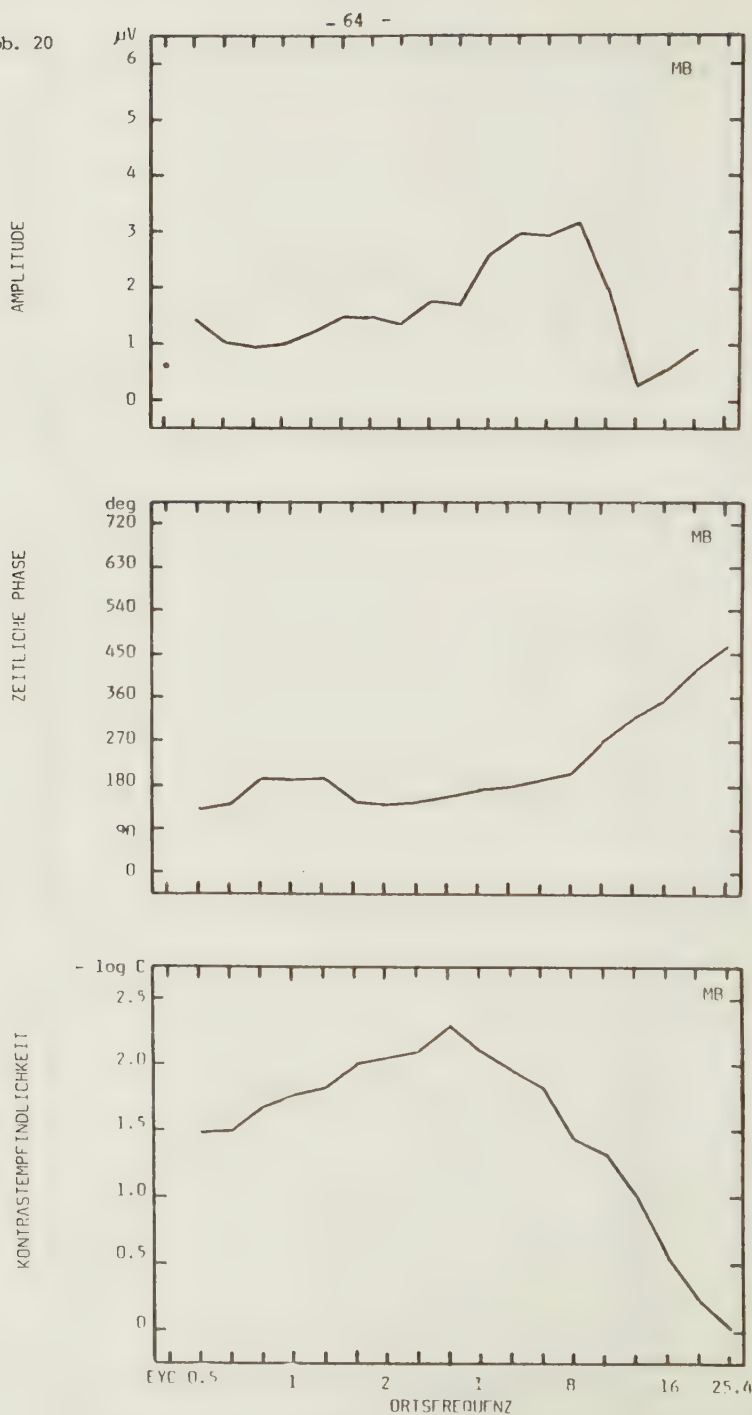
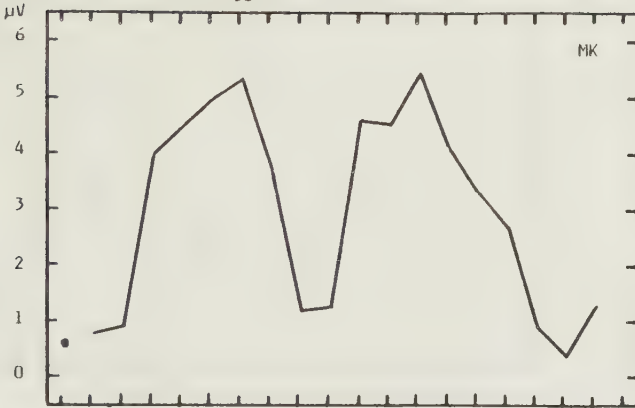


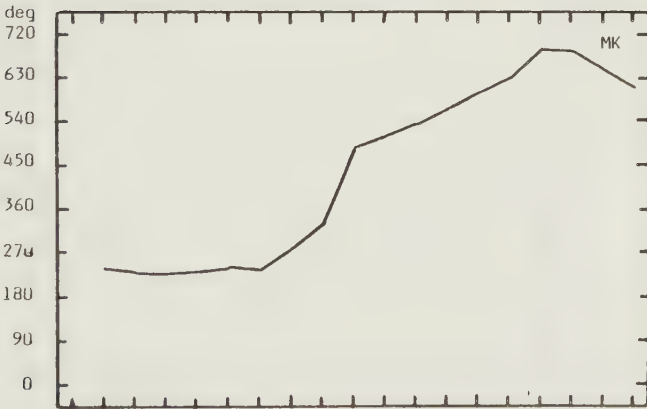
Abb. 21

- 65 -

AMPLITUDE



ZEITLICHE PHASE



KONTRASTEMPfindlichkeit

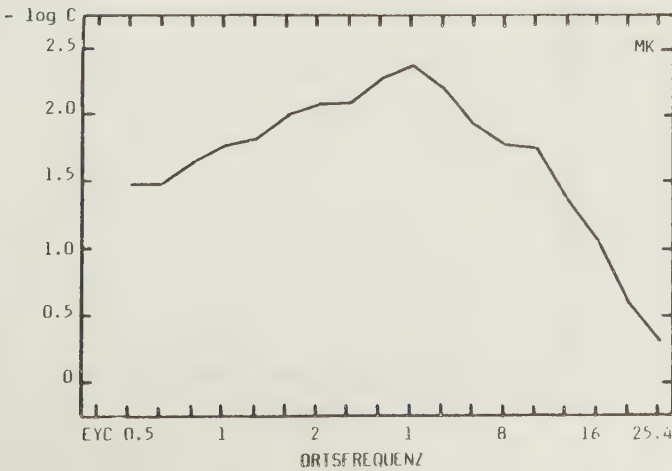


Abb. 22

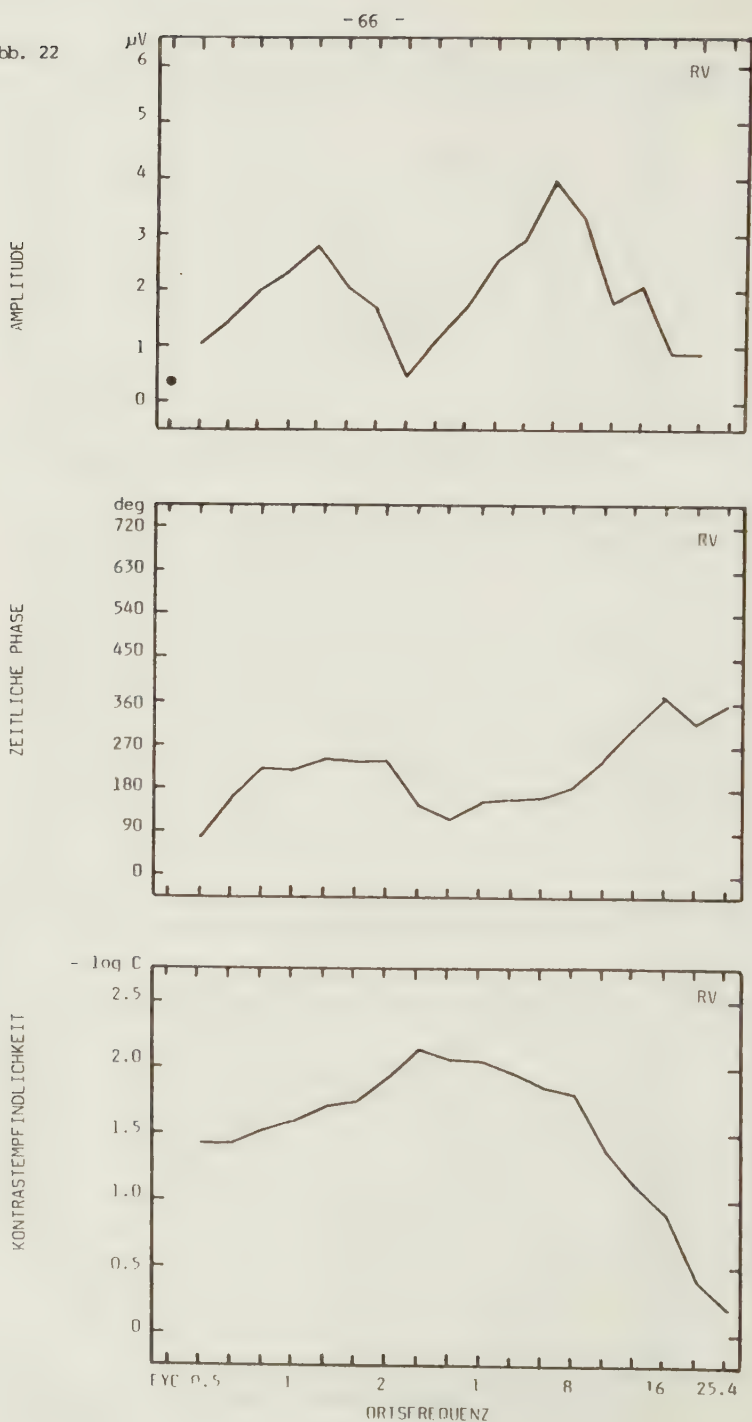


Abb. 23

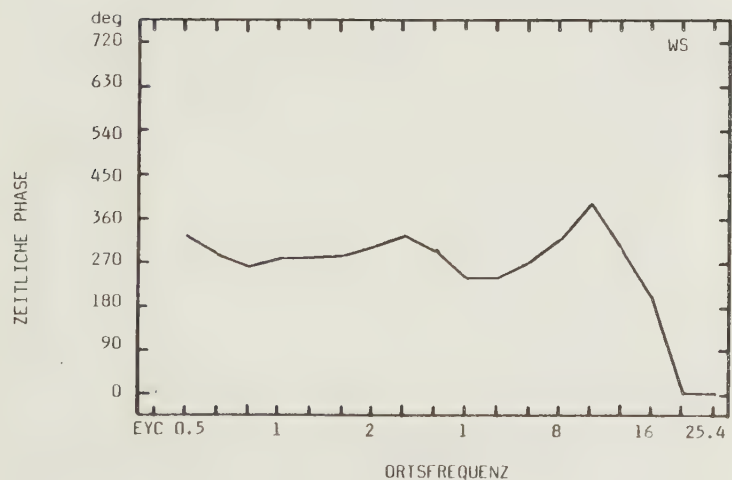
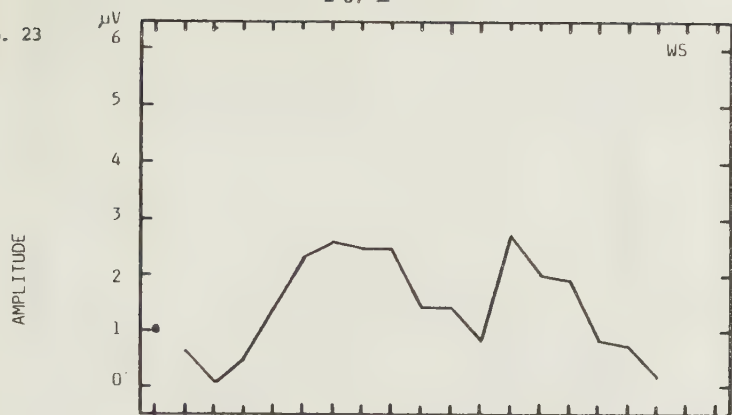


Abb. 24

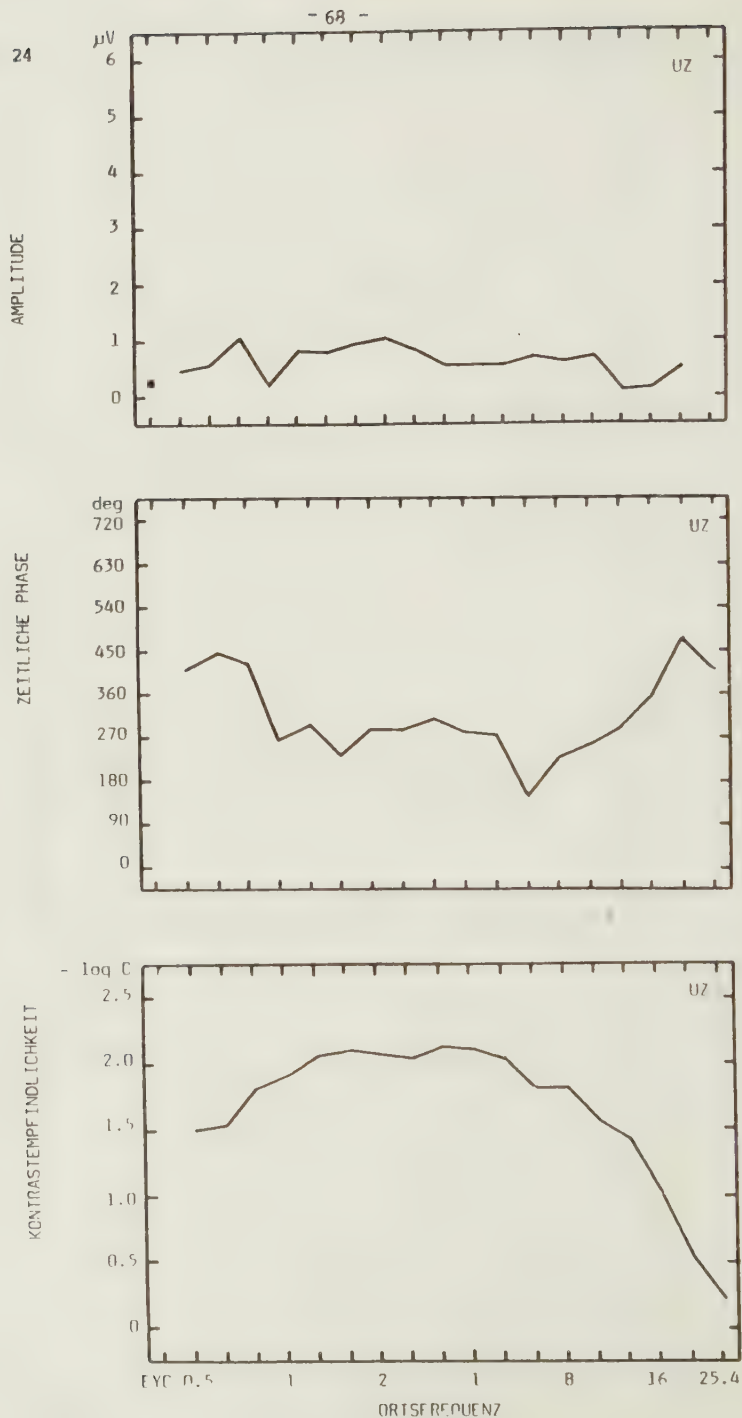


Abb. 25. Amplitudenkurven der Vp JL (weitere Einzelheiten siehe Text).



Abb. 25 - Abb. 29

stellen perspektivisch dreidimensional die Amplitudenkurven für sechs Kontrastwerte (40%, 30%, 20%, 10%, 5%, 1%) dar (Strasburger, 1983). Es handelt sich dabei um Daten, die mit den Vpn RV, BW, AS, MB und JL gemessen wurden.

cpd entspricht einem Maß für die Ortsfrequenz, C steht für Kontrast.

Abb. 26. Amplitudenkurven der Vp BW (weitere Einzelheiten siehe Text).



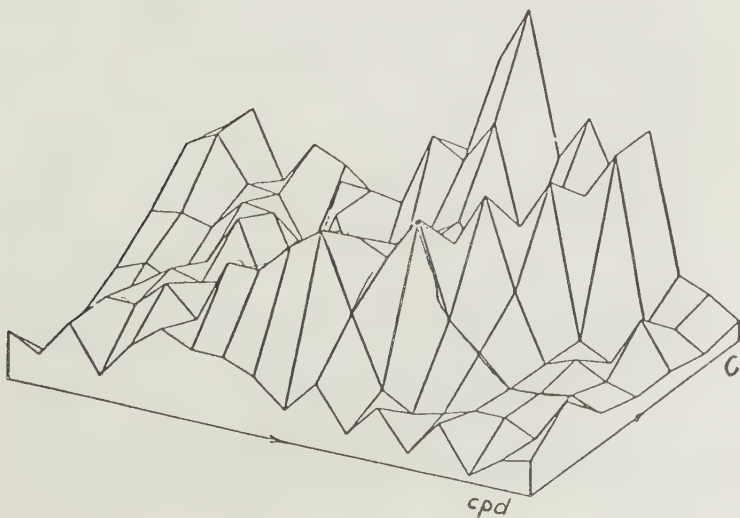
Abb. 27. Amplitudenkurven der Vp RV (weitere Einzelheiten siehe Text).



Abb. 28. Amplitudenkurven der Vp AS (weitere Einzelheiten siehe Text).



Abb. 29. Amplitudenkurven der Vp MB (weitere Einzelheiten siehe Text).



4.5 Diskussion der Versuchsergebnisse

An den vorhergehend aufgeführten Versuchsergebnissen (Abb. 7 - Abb. 24) fällt neben der erheblichen interindividuellen Variationsbreite im Amplituden-Ortsfrequenzgang vor allem die Unterschiedlichkeit von Kontrastempfindlichkeitsfunktion und VEP-Amplitudenverhalten auf.

Obwohl die VEP die Aktivität des visuellen Systems widerspiegeln, wie sie sich - im Gegensatz zur Kontrastempfindlichkeitsfunktion, die das Resultat einer Schwellenmessung ist - auf überschwelligem Erregungsniveau darstellt, fehlt es in der Literatur nicht an Berichten, in denen eine Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus beiden Meßmethoden behauptet wird. So fanden beispielsweise Fiorentini et al (1980), daß beide Verfahren bei Kontrasten zwischen 20% und 50% durchaus vergleichbare Resultate liefern. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen Pirchio et al (1978) in einer Studie zur VEP-ermittelten Kontrastempfindlichkeit bei Kleinkindern. Auch Rentschler und Spinelli (1978, 1983) weisen Befunde vor, die eine Ähnlichkeit zwischen VEP-Amplitudenverlauf und Kontrastempfindlichkeitsfunktion zu belegen scheinen. Dem entgegen wurde im Rahmen dieser Arbeit festgestellt, daß der Amplituden-Ortsfrequenzgang bei zahlreichen Vpn einen doppelgipfligen Kurvenverlauf zeigt. Es kommt dabei in vielen Fällen vor, daß der Amplitudenwert an eben jener Stelle praktisch gegen Null geht, die die Kontrastempfindlichkeitsfunktion als Ort der größten Sensibilität des visuellen Systems ausweist. Solche mehrgipfligen VEP-Amplitudenverläufe werden u. a. auch von Tyler, Apkarian und Nakyama (1978) berichtet. Wenngleich diese bimodale Amplituden-Ortsfrequenzbeziehung häufig - in mehr oder minder starker Ausprägung - gemessen werden konnte, stellt sie keineswegs einen ausschließlichen Typ dar. Neben eher eingipfligen, relativ zerklüfteten Kurvenzügen (siehe z. B. Abb. 19) konnten auch Messungen gemacht werden, die einen Amplituden-

gang erbrachten, der kaum vom Rauschen zu unterscheiden ist (siehe Abb. 12 und Abb. 24).

Auffällig erscheint auch der geringe Unterschied zwischen den Kontrastempfindlichkeitsfunktionen der einzelnen Vpn (Abb. 7 - Abb. 24), wenn man ihn mit den doch erheblichen interindividuellen Differenzen der VEP-Amplituden vergleicht. Das deutet daraufhin, daß die VEP-Amplituden als Maß der visuellen Empfindlichkeit kaum in Frage kommen. Zu dieser Auffassung kommt auch Strasburger (1986). Interessante Eigenschaften weist auch der Phasengang der gemessenen VEP auf. Rentschler und Spinelli (1983) beobachteten, daß die Latenz oder Phase von VEP mit ansteigender Ortsfrequenz zunimmt. Die hier vorgestellten Meßdaten unterstützen weitgehend diese Befunde. Zwei Vpn jedoch scheinen von diesem vorherrschenden Phasenverhalten abzuweichen. So zeigten EH und WS (Abb. 16 und Abb. 23) einen zur Abzisse parallel verlaufenden Phasengang. Bei fast allen Vpn macht sich zwischen 2 und 5 cpd, also im Bereich des Minimums vieler VEP-Amplituden, ein "Phasensprung", d. h. eine abrupte Änderung der Phasenganges von bis zu 200° bemerkbar. Eine vergleichbare Beobachtung machen Tyler, Apkarian und Nakayama (1978).

Es erhebt sich nun die Frage, wodurch die beschriebenen Phänomene, vor allem das des Einbruchs im Amplituden-Ortsfrequenzgang, zustande kommen. Es liegt nahe hinter dem, bei manchen Vpn sehr unregelmäßig verlaufenden Amplitudengang, Artefakte zu vermuten. Dagegen kann man jedoch einwenden, daß sich die VEP durch relativ große intraindividuelle Reproduzierbarkeit auszeichnen, wie das u. a. durch eigene Messungen belegt werden kann (siehe Abb. 4). Zudem sind durch Versuchsaufbau und -Auswertung Vorkehrungen getroffen, um das Auftreten von Artefakten durch zufällig auftretende Störgrößen zu vermeiden (siehe dazu 3.2 und 3.5).

Um einer Erklärung der geschilderten Einbrüche im Amplituden-Orts-

frequenzgang näherzukommen, stellten einige Autoren Betrachtungen an, die vorwiegend Interaktionen zwischen verschiedenen Kanälen und Mechanismen des Sehsystems betreffen.

Harter et al (1977) untersuchten eine Reihe von Säuglingen, bei denen sie zur Sehschärfestimmung mit Schachbrettmustern VEP auslösten. Ihre Messungen zeigten zum Teil eine bimodale Verteilung der VEP-Amplituden. Als Erklärung diskutierten sie die Aktivierung zweier unterschiedlicher Neuronenpopulationen, die jeweils entweder durch relativ hohe oder relativ niedrige Ortsfrequenzen erregt werden. Sie stützten ihre Vermutung darauf, daß die Schätzung der frühkindlichen Sehschärfe verschiedene Werte erbringt, je nach dem, ob der Untersuchung eine Technik unterliegt, die sich des optokinetischen Nystagmus oder des "preferential looking" bedient. Im ersten Fall nehmen sie die Aktivierung einer subkortikalen, im zweiten die Erregung einer kortikalen Neuronengruppe an. Ähnliche Unterschiede ergeben sich auch bei VEP-Messungen, wenn einmal eher niedere, ein anderes Mal eher hohe Ortsfrequenzen als Stimuli dienen. Regan (1980) verleiht der Vermutung Ausdruck, das Auslöschungsphänomen im Amplituden-Ortsfrequenzgang könne durch Interaktionen zwischen von der oberen und unteren Hemiretina herrührenden Erregungen zustande kommen.

Eigene, von Strasburger angeregte, unsystematische Messungen ergaben jedoch, daß auch bei Halbfeldreizungen Einbrüche im Amplitudenverlauf auftreten. Strasburger (1986) schlägt ein Hoch- und ein Niederkontrastsystem vor, wobei das erstere seine maximale Empfindlichkeit im Bereich der niederen, das letztere im Bereich der höheren Ortsfrequenzen haben soll. Dem entspricht, daß der doppelgipflige Amplituden-Ortsfrequenzgang bei einer Reduktion des Kontrastes in der Nähe der Schwelle in einigen Fällen einem eher eingipfligen Amplitudenverlauf weicht (siehe Abb. 25 und Abb. 28)

Kulikowski und Tolhurst (1972) untersuchten die visuelle Empfind-

lichkeit für zeitlich veränderliche Sinusgitter. Sie stellten fest, daß für phasenalternierende Sinusgitter zwei Schwellen existieren: Der minimale Kontrast, bei dem die Vp gerade das Gittermuster als solches erkennt und der - für niedere Ortsfrequenzen geringere - Kontrast, bei dem die Vp einen Bewegungseindruck, verursacht durch die Phasenbewegung, haben. Sie fanden, daß eine Unterscheidung beider Schwellen in einem Bereich zwischen 0,25 und 0,5 cpd möglich ist. Bei höheren Ortsfrequenzen entsteht der Bewegungseindruck erst dann, wenn auch das Muster erkennbar ist. Aus diesen Befunden leiteten die Autoren die Existenz von zwei Systemen ab, von denen eines nach ihrem Dafürhalten die räumliche Struktur eines Stimulus, das andere seinen zeitlichen Kontrastverlauf analysiert. Diese beiden hypothetischen Systeme bringen sie in Zusammenhang mit bestimmten Zellen, die Enroth-Cugell und Robson (1966) in der Retina der Katze entdeckten und als X- und Y-Zellen bezeichneten. Cleland et al (1971) beschrieben X-Zellen als tonische (sustained cells) und Y-Neurone als phasische (transient cells) Zellen. Saito, Shimahara und Fukada (1971) fanden, ebenfalls bei der Katze, Neurone ähnlicher Eigenschaften und nannten sie Typ I- und Typ II-Zellen. Es besteht mittlerweile Einigkeit unter den Autoren, daß Typ I-Fasern mit Y-Zellen und Typ II-Fasern mit X-Zellen identisch sind. Y-Zellen feuern weder bei Dunkelheit noch bei Dauerbeleuchtung, reagieren aber sofort bei einer zeitlichen Zu- oder Abnahme der Leuchtstärke mit einer Salve von Aktionspotentialen. Mathematisch gesehen bilden also Y-Zellen den ersten Differentialquotienten der Leuchtstärke nach Zeit. X-Zellen werden durch kontinuierliche Beleuchtung oder Abdunkelung erregt, erhalten die Erhöhung der Impulsrate während der Dauer der Beleuchtung aufrecht und fallen nach Entfernung des Reizes kurzzeitig auf ein Erregungsniveau ab, das sich unterhalb ihrer Ruhelage befindet. Ein Gittermuster, wie z. B.

ein Sinusgitter, erregt sowohl phasische Y- als auch tonische X-Zellen. Wenn die Ortsfrequenz der Gitter zunimmt, antworten die tonischen X-Zellen mit einer linearen Zunahme ihrer Entladungsfrequenz, die phasischen Y-Zellen reagieren mit einem nichtlinearen Anstieg der Impulsrate (Cleland et al, 1971; Saito, Shimahara und Fukada, 1970).

In diesem Zusammenhang ist die von Bodis-Wollner und Hendley (1977) publizierte Arbeit von Interesse, in der sie phasenalternierende Sinusgitter verwendeten, um den Einfluß der zeitlichen Kontrastmodulation auf VEP zu untersuchen. Sie gehen dabei von der Hypothese aus, daß phasenalternierende Sinusgitter neben der räumlichen Veränderung der Leuchtstärke, nämlich die jeweilige Ortsfrequenz, auch eine zeitliche Veränderung derselben enthalten, die durch die in einer halben Periode stattfindende Phasengegenbewegung zustande kommt. Auch diese Autoren erörtern, ob der Verlauf der VEP-Amplituden durch eine Wechselwirkung zwischen zwei verschiedenen Zellsystemen, wie die oben beschriebenen, beeinflusst wird.

Burbeck und Kelly (1981) bestimmten die Kontrastschwelle eines vertikalen Sinusgitters, das sie auf ein anderes, horizontales, gleicher Zeit- und Ortsfrequenz projizierten, dessen Kontrast feststand. Die Vpn hatten die Aufgabe, den Kontrast des vertikalen Gitters so lange zu erhöhen, bis es über dem horizontalen sichtbar wurde. Die Autoren trugen das Maß der Schwellenänderung als Funktion des Kontrastes des Hintergrundgitters auf. Dabei stellte sich heraus, daß für die von ihnen gemessenen zeitlichen Reizfrequenzen zwischen 1 und 30 Hz die Schwellenänderung, aufgetragen gegen den Kontrast des Hintergrundgitters, für die Ortsfrequenzen von 0,25 - 2 cpd auf einer steileren Kennlinie verläuft als für alle höheren Ortsfrequenzen. Die größte Schwellenänderungsrate stellten die Autoren für niedere Orts- und hohe Zeitfrequenzen fest. Anders ausgedrückt: Für niedere Ortsfrequenzen und hohe Zeitfrequenzen ist

die Maskierung des Testgitters effektiver als für alle anderen Kombinationen für Orts- und Zeitfrequenz. Diesen Autoren zufolge soll der Mechanismus, der bei menschlichen Vpn für die Entdeckung niederer Ortsfrequenzen und jener, der für die Wahrnehmung hoher Ortsfrequenzen entscheidend ist, ein ähnliches Verhalten zeigen, wie die Y- und X-Zellen der Katzenretzhaut.

Es ist noch anzumerken, daß Y- und X-Zellen eine unterschiedliche Reizleitungsgeschwindigkeit aufweisen. Y-Zellen leiten durchschnittlich mit einer Geschwindigkeit von 35 - 45 m/s, X-Zellen erreichen eine Leitungsgeschwindigkeit von 20 - 25 m/s (Fukada, 1971).

Der Begriff der Phase, wie er in der vorliegenden Arbeit Verwendung findet, hängt mit dem der Totzeit zusammen, der aus der Regelungstechnik stammt. Unter Totzeit wird diejenige Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal verstanden, die durch die endliche Leitungsgeschwindigkeit des Kanals entsteht (Schmidt, 1982). Der Phasengang bei gegebener Totzeit zeigt eine Abhängigkeit von der Frequenz eines Signals. Mit zunehmender Frequenz kann die Phasenverschiebung bis zu 180° betragen. Es wäre denkbar, daß der Unterschied in der Leitungsgeschwindigkeit zweier Kanäle, wie in diesem Fall des phasischen Y-Zellenkanals und des tonischen X-Zellenkanals, zu einer Phasenverschiebung zwischen den Signalen, die diese Kanäle passieren, führt. Mit zunehmender Frequenz der Eingangssignale kann der Unterschied im Phasengang 180° annehmen, so daß sich beide Signale wegen ihrer Gegenläufigkeit auslöschen. Sollte der bei vielen Vpn beobachtete Rückgang der VEP-Amplitude, in einigen Fällen bis auf Rauschniveau, auf ein solches Phänomen zurückzuführen sein? Interessanterweise tritt der in 4.3 beschriebene "Phasensprung" im selben Bereich auf wie die Amplitudenreduktion.

Beim derzeitigen Stand der Kenntnisse kann jedoch nicht geklärt werden, welches der beiden Systeme, wenn sie beim Menschen vorkom-

men, im überschwelligen Bereich, in dem die VEP-Messungen stattfinden, bei bestimmten Ortsfrequenzen den entscheidenden Beitrag zur Gesamterregung leisten. In den meisten Untersuchungen am Menschen, die sich mit der Erforschung der Eigenschaften unterschiedlicher Informationskanäle im visuellen System befassen, verwendete man psychophysische Techniken. Außerdem handelte es sich vorwiegend um Schwellenmessungen. Dem entgegen wurden die in dieser Arbeit vorgestellten VEP durch Reize evoziert, die weit überschwellig waren. Wegen der mehrfach erwähnten nichtlinearen Reaktionsweise des visuellen Systems können aber Schwellenmessungen mit Meßdaten aus dem überschwelligen Bereich nicht unbedingt verglichen werden. Nach unveröffentlichten Messungen von Rentschler (1977) verringert sich die Dichotomie zwischen Mustererkennungsschwelle und der Schwelle des Bewegungseindrucks bei Reizung mit phasenalternierenden Sinusgittern zu höheren Zeitfrequenzen hin. Es ist daher durchaus möglich, daß bei einer Zeitfrequenz von 8 Hz, wie sie in der vorliegenden Arbeit Verwendung fand, der Unterschied in der Reaktionsweise beider Zellsysteme, wenn man ihre Existenz für den Menschen annehmen will, sehr gering ist.

X- und Y-Zellen und ihre Eigenschaften wurden ausschließlich am Tiermodell, vor allem bei der Katze und am Affen, untersucht. Schon bei diesen beiden Tierarten treten erheblich divergierende Befunde zutage. Daraus wird deutlich, daß solche Erkenntnisse nur mit grosser Vorsicht auf den Menschen übertragen werden können.

Zudem sind die Interaktionsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Zellsystemen und Verarbeitungsebenen im visuellen System derzeit noch zu wenig überschaubar, um eine Klärung der hier anstehenden Frage herbeizuführen. Es sei u. a. nur darauf hingewiesen, daß auf der Ebene des Corpus geniculatum laterale, nach einem Modell von Selfton und Bruce (1971) der kontralaterale visuelle Kortex einen hemmenden Einfluß ausüben soll. Ebenfalls im lateralen Kniekörper

soll eine Inhibition der Erregung des dominanten - durch das nicht-dominante Auge stattfinden (Suzuki, Kato, 1966). In der Netzhaut fand man neben X- und Y-Zellen auch andere Zelltypen. So beschrieben z. B. Stone und Hofmann (1972) sogenannte W-Zellen mit von X- und Y-Zellen verschiedene Charakteristika.

Der zukünftigen klinischen Anwendung stationärer VEP muß also eine noch weitreichendere Erforschung der funktionalen Zusammenhänge im visuellen System vorausgehen, um damit ihre Entstehung und vor allem auch ihre strukturellen Eigenschaften verstehen zu können. Erst dann wird es möglich sein, die hier beschriebene elektrophysiologische Methode im strengen Sinne zur Analyse von Wahrnehmungsprozessen einzusetzen.

5. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit einer von Strasburger (1986) entwickelten Methode zur rechnergestützten Erfassung und Analyse stationärer, visuell evozierter Hirmpotentiale eine größere Population augengesunder Versuchspersonen zu untersuchen. Dabei galt es vor allem, interindividuelle Unterschiede und Gemeinsamkeiten von stationären VEP darzustellen. Zudem sollte die von vielen Autoren behauptete Ähnlichkeit zwischen VEP-Amplituden-Ortsfrequenzgang und Kontrastempfindlichkeitsfunktion überprüft werden.

Die stationären VEP wurden durch Reizung mit phasenalternierenden Sinusgittern variabler Ortsfrequenz gewonnen. Im Unterschied zu den heute in der Klinik gebräuchlichen transienten VEP sind stationäre VEP schneller zu erfassen und gestatten daher eine größere Variation der Reizparameter. Damit soll in Zukunft eine detaillierte Beschreibung und Untersuchung des visuellen Systems möglich werden.

Zu Beginn der Voruntersuchungen stellte sich heraus, daß bei weiblichen Vpn in der Regel größere VEP-Amplituden meßbar sind als bei männlichen. Diese Ergebnisse stehen mit den Befunden in Einklang, die Dustman et al (1977) veröffentlichten. Desweiteren lag das Interesse auf der Untersuchung der intraindividuellen Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse, des Verhaltens stationärer VEP bei rasch aufeinanderfolgenden Versuchssitzungen und der Abhängigkeit der VEP-Amplituden von der Größe des Schwinkels. Es zeigte sich, daß, die während eines Zeitraums von acht Monaten an einer Vp gewonnenen VEP relativ stabil bleiben, sich aber doch auch eine gewisse Variation, was Form und Höhe der VEP-Amplituden anbelangt, bemerkbar macht. Darüberhinaus konnte festgestellt werden, daß eine

Vergrößerung des Seh winkels sich vor allem bei den niedrigen Ortsfrequenzen auswirkt, wo sie sich in einer Zunahme der VEP-Amplituden manifestiert.

Die Hauptuntersuchungen erbrachten mehrere wichtige Ergebnisse:

- 1) Die Mehrzahl der Probanden zeigt in ihrem VEP-Amplitudenverhalten einen mehrgipfligen Kurvenverlauf. In einem Ortsfrequenzbereich (2-4 cpd), in dem die psychophysische Kontrastempfindlichkeitsfunktion ihr Maximum annimmt, geht die VEP-Amplitude oftmals auf Werte zurück, die unterhalb des Rauschniveaus liegen. An der selben Stelle zeigt sich häufig ein "Sprung" im Phasengang mit starker Änderung der Phasenwerte.
- 2) Die Ergebnisse von fünf weiteren Vpn lassen sich schwer einordnen. Sie zeigen entweder einen mehr oder minder eingipfligen Kurvenverlauf mit entweder einem Maximum im Bereich der höheren (MB, Abb. 20; EM, Abb. 17) - oder einem solchen im Bereich der niederen Ortsfrequenzen (JL, Abb. 19). Zwei Vpn (CF, Abb. 12 und UZ, Abb. 24) zeigen überhaupt keine Amplitudenwerte, die sich über das Rauschniveau erheben. Auch zeigt sich ein nur geringer Unterschied zwischen den Kontrastempfindlichkeitsfunktionen der einzelnen Vpn (Abb. 7-24), während die VEP-Amplitudenwerte der Probanden doch erheblich voneinander abweichen. Daraus läßt sich folgern, daß die Größe der VEP-Amplituden nicht als Maß der visuellen Empfindlichkeit dienen kann (siehe dazu auch Strasburger, 1986)
- 3) Es konnte bestätigt werden, daß die Signalantwort hauptsächlich in der 16 Hz - Komponente des EEG's liegt

Zu dem auffälligen Amplitudenverhalten im Bereich von 2 - 4 cpd und dem "Phasensprung" bei den selben Ortsfrequenzen, werden verschiedene Erklärungsvorschläge diskutiert. Der Grundgedanke dieser Modelle besteht in der Annahme zweier sich wechselseitig beeinflussender neuronaler Systeme oder Mechanismen, die in der Umgebung der angesprochenen Ortsfrequenzen zu einer Auslöschung der VEP-Amplituden führen.

Es wird darauf hingewiesen, daß keines der angesprochenen Modelle eine befriedigende Erklärung für die Phänomene liefert, die im VEP-Amplituden - und Phasengang beobachtet werden.

Als Voraussetzung für die klinische Anwendbarkeit stationärer VEP sind noch eine Reihe zusätzlicher Untersuchungen notwendig. Es gilt dabei vor allem klinisch definierte Störungen im visuellen System mit eindeutigen Veränderungen bei stationären VEP zu korrelieren. Die Interpretation derartiger Befunde muß jedoch mit der Aufklärung der Mechanismen einhergehen, die für die Generierung der beschriebenen VEP-Antworten maßgebend sind.

6. Literaturverzeichnis

Bodis-Wollner, I. & Hendley, C. D. (1977). Relation of evoked potentials to pattern and local luminance detectors in the human visual system. In: Desmedt: Visual evoked potentials in man: New developments. 197-207.

Burbeck, C. A., Kelly, D. H. (1981). Contrast gain measurements and the transient/sustained dichotomie. J. Opt. Soc. Am. Vol. 71, No. 11, 1335-1342.

Campbell, F. W. & Maffei, L. (1970). Electrophysiological evidence for the existance of orientation and size detectors in the human visual system. J. Physiol. 207, 635-652.

Cleland, B. G., Dubin, M. W., Levick, W. R. (1971). Sustained and transient neurones in the cat's retina and lateral geniculate nucleus. J. Physiol. (Lond) 217: 473-496.

Creutzfeld, O. D., Kuhnt, U. (1967). The visual evoked potentials: Physiological, developmental and clinical aspects. Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. (Suppl) 26: 29-41.

Creutzfeld, O. D., Kuhnt, U. (1973). Electrophysiology and topographical distribution of visual evoked potentials in animals. In: Jung, F. (ed), Central processing of visual information. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (Handbook of sensory physiology, vol VII/3 p 595-637).

Diener, H. C. (1980). Visuell evozierte Potentiale als diagnostische Hilfe. Z. prakt. Augenheilkunde 4: 17-22.

- Fiorentini, A., Pirchio, M., Spinelli, D. (1980). Scotopic contrast sensitivity in infants evaluated by evoked potentials. Invest. Ophthalm. Visual. Sci. 19, 950-955.
- Dustman, R. E., Schenkenberg, T., Lewis, E. G., Beck, E. C. (1977). The cerebral evoked potential: life-span changes in twin studies. In: Desmedt: Visual evoked potentials in man: New developments. 363-377.
- Enroth-Cugell, C., Robson, J. G. (1966). Contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. J. Physiol. (Lond) 187: 517-552.
- Flechtner (1970). Grundbegriffe der Kybernetik. DTV.
- Fukada, Y. (1971). Receptive field organization of cat optic nerve fibers with special reference to conduction velocity. Vision Res 11: 209-226.
- Harter, M. R., Deaton, F. K. & Odom, J. V. (1977). Pattern visual evoked potentials in infants. In: Desmedt, J. E. (Ed) Visual evoked potentials in man: New developments. Oxford. 332-352.
- Hartline, H. K. (1940). The receptive fields of optic nerve fibers. Am J. Physiol. 130: 690-699.
- Hartline, H. K. (1940). The effects of spatial summation in the retina on the excitation of the fibers of the optic nerve. Am J. Physiol. 130: 700-711.
- Henerici, M., Wenzel, D., Freund, H. J. (1977). The comparison of small size rectangle and checkerboard stimulation for the evaluation of delayed visual evoked responses in patients suspected to multiple sclerosis. Brain 100: 119-136.

Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *J. Physiol.* 160, 106-154.

Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. (1977). Functional architecture of macaque monkey visual cortex. *Proc. R. Soc. Lond. B* 198, 1-59.

Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. (1979). Brain mechanisms of vision. *Scientific American* 241 (3), 130-144.

Jörg, J. (1984). Visuell evozierte Potentiale in der neurologischen Diagnostik. In: *Evozierte Potentiale in Klinik und Praxis*: 30-55. Springer Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.

Jörg, J., Hielscher, H. (1982). Bedeutung der optisch und somato-sensorisch evozierten Potentiale für die neurologische Diagnostik. *Dtsch. Med. Wschr.* 107: 1403-1408.

Keidel, W. D. (1964). Zur Frage der Korrelierbarkeit zwischen objektiver und subjektiver Sinnesphysiologie. In: *Informationsverarbeitung und Kybernetik. Studien und Berichte der Kath. Akademie in Bayern. Band 32.* Würzburg: Echter.

Kelly, D. H. and van Essen, D. C. (1974). Cell structure and function in the visual cortex of the rat. *J. Physiol. Lond.* 238. 515-547.

Kuffler, S. W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *J. Neurophysiol.* 16: 37-68.

Kulikowski, J., Tollhurst (1972). Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision. *J. Physiol.*, 232, pp. 149-162.

Lorbeer , B. (1982). Die elektrophysiologische Analyse der Sehfunktion bei Amblyopie. Diss., Universität München.

Marko (1977). Methoden der Systemtheorie. Springer Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.

Pirchio, M., Spinelli, D., Fiorentini, A. & Maffei, L. (1978). Infant contrast sensitivity evaluated by evoked potentials. Brain Res. 141, 179-184.

Regan, D. (1972). Evoked potentials in psychology, sensory physiology and clinical medicine. Chapman & Hall, London.

Regan, D. (1966). Some characteristics of average steady state and transient responses evoked by modulated light. Electroenceph. Clin. Neurophysiol. 20: 238-248.

Regan, D., Heron, H. R. and Milner, B. A. (1974). Differential diagnosis of multiple sclerosis by visual evoked potential recording. Brain 97: 755-772.

Regan, D. (1980). Speedy evoked potential method for assessing vision in normal and amblyopic eyes: Pros and cons. Vision Res 20, 265-269.

Rentschler, I. (1977). Persönliche Mitteilung.

Rentschler, I. and Spinelli, D. (1978). Accuracy of evoked potential refractometry using bar gratings. Acta Ophthal. 56: 67-74.

Rentschler, I. and Spinelli, D. (1983). Phaselag in human contrast evoked potentials. In: Festschrift for Ivo Kohler. Lawrence Erlbaum Publishers, Springfield IFF in press.

Rogge, K. E. (1981). Physiologische Psychologie. Urban & Schwarzenberg, München.

Rudolph, H. D. (1980). Die Latenz visuell evozierter Potentiale nach diffusen und Scanning-Blitzen. EEG-EMG 11: 36-42.

Saito, H., Shimahara, T., Fukada, Y. (1970). Four types of responses to light and dark spot stimuli in the cat optic nerve. Tohoku J. Exp. Med: 102: 127-133.

Saito, H., Shimahara, T., Fukada, Y. (1971). Phasic and tonic response in the cat optic nerve fibers-stimulus-response relations. Tohoku J. Exp. Med. 104: 313-323.

Selfton, A. J., Bruce, I. S. C. (1971). Properties of cells in the lateral geniculate nucleus. Vision Res (suppl) 3: 239-252.

Schmidt, D. (1982). Grundlagen der Regelungstechnik. Springer Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.

Schmidt, R. F. (1980). Grundriß der Sinnesphysiologie. Springer Berlin, Heidelberg, New York, Tokio. 4. Auflage.

Sokol, S. (1980). Visual evoked potentials. In: Electrodiagnosis in Clinical Neurology (Edited by Aminoff, M. J.), pp. 348-369. Churchill Livingstone, New York.

Senelick, R. Ch. (1979). Optic nerve. In: Physiology of the human eye and visual system. (Edited by R. E. Records), pp. 506-542.

Spekreijse, H. (1966). Analysis of EEG responses to diffuse and patterned light in the human (Thesis) O. W. Junk, The Hague.

Stone, J., Hoffmann, K. P. (1972). Very slow-conducting ganglion cells in the cat's retina: a major, new functional type? Brain Res 43: 610-616.

Strasburger, H. (1982). Digital fast sweep technique for studying steady state visual evoked potentials. In Vorbereitung.

Strasburger, H. (1986). Stationäre visuell evozierte Hirmpotentiale. Diss., Universität München.

Suzuki, H., Kato, E. (1966). Binocular interaction at cat's lateral geniculate body. J. Neurophysiol. 29: 909-920.

Tyler, C. W., Apkarian & Nakayama, K. (1978). Multiple spatial-frequency tuning of electrical responses from human visual cortex. Exp. Brain Res 33: 535-550.

Van der Tweel, L. H. and Verduyn Lunel, H. F. E. (1965). Human visual responses to sinusoidally modulated light. Electroenceph. Clin. Neurophysiol. 18: 587-598.

Lebenslauf

Personalien

Name: Scheidler, Wolfgang Anton
Geburtsdatum: 29. September 1953
Geburtsort: Gröbenzell, Kreis Fürstenfeldbruck
Familienstand: ledig
Konfession: römisch-katholisch
Wohnort: 8038 Gröbenzell, Kirchenstraße 8

Schulische Ausbildung

1959 - 1967 Volksschule in Gröbenzell
1967 - 1971 Berufsschule für Elektroh Handwerk in Fürstenfeld-
bruck
1971 - 1974 Berufsaufbauschule in München
1974 - 1976 Berufsoberschule in München

Abschlüsse

Berufsschulabschluß 1971 (Facharbeiterprüfung)
Fachschulreife 1974
Fachhochschulreife 1976
Zusatzprüfung zur allgemeinen Hochschulreife 1978

Berufliche Ausbildung

1967 - 1971 Lehre als Flugzeugmechaniker bei der Standortver-
waltung Fürstenfeldbruck
1971 Facharbeiterprüfung
1978 - 1985 Studium der Humanmedizin
September 1981 - 1. Teil der ärztlichen Prüfung
März 1983 - 2. Teil der ärztlichen Prüfung
November 1985 - 3. Teil der ärztlichen Prüfung

Berufstätigkeit

1967 - 1971 Auszubildender bei der Standortverwaltung Fürsten-
feldbruck
1971 - 1972 Elektromechaniker bei AEG-Telefunken München
1972 - 1974 Technischer Zeichner bei Siemens-AG München
1976 - 1978 Wehrdienst bei der Waffenschule 50 der Luftwaffe
in Fürstenfeldbruck
1984 Studentische Hilfskraft am Institut für Medizini-
sche Psychologie
01.02.86 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für
Medizinische Psychologie

An dieser Stelle möchte ich vor allem
Herrn Prof. Ingo Rentschler danken,
unter dessen Anleitung und großer Ge-
duld diese Arbeit entstand.

Für ihre zahlreichen Hilfeleistungen,
Tips und ihre stets freundliche und
geduldige Unterstützung danke ich
ebenfalls Herrn Hans Strasburger
und Herrn Bernhard Treutwein.

